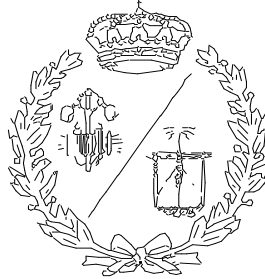


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



**Proyecto Fin de Grado**

**SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL  
DEL NIVEL DE AGUA DEL EMBALSE DE ALSA**

**(MONITORING AND CONTROL SYSTEM OF THE  
WATER LEVEL IN THE ALSA RESERVOIR)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**Autor: Roberto Alonso Mijangos**

**Tutor académico: Luciano Alonso Rentería**

**Julio - 2020**



## **Agradecimientos**

Me gustaría agradecer a mi tutor, Luciano, la cooperación e interés que ha mostrado en este trabajo, por haber sido mi guía y haber mantenido la misma energía y paciencia durante todas las fases del proyecto.

También quiero agradecer la cooperación y paciencia mostrada por José Luis, jefe del despacho de operaciones centrales hidráulicas de Repsol, por haberme facilitado los planos y la información necesaria para poder completar este proyecto que tanta ilusión me hacía.

Después de un duro y largo camino para llegar hasta aquí, quiero agradecer a mi madre, a mi padre y a mi hermana el apoyo y ánimo transmitido durante todo este tiempo, ya que sin ellos no lo hubiera conseguido.

Para conseguir superar esta carrera, no existen atajos, tan solo sirve el esfuerzo, trabajo y sacrificio, realizado durante cuatro intensos años. En estos años como universitario, he crecido como persona como nunca lo había hecho antes, he aprendido que la gente maravillosa escasea y no voy a separarme de las que he encontrado. Con esto, quiero agradecer a todos los amigos que me han ayudado y han estado en los momentos difíciles.

# Índice

<b>Capítulo 1:</b>	15
1 La generación de energía	16
1.1 Objeto del trabajo	16
1.2 La energía en España	17
1.3 La energía eólica	19
1.4 La energía hidráulica	19
1.5 La energía fotovoltaica	20
1.6 Disposición del trabajo	21
<b>Capítulo 2:</b>	22
2 Tipos de presas	23
2.1 Presas de hormigón o de fábrica	23
2.1.1 Presas de gravedad	24
2.1.2 Presas de arco	26
2.2 Presas de materiales sueltos	27
2.2.1 Presas homogéneas	28
2.2.2 Presas de núcleo	29
2.2.3 Presas de pantalla	30
2.3 Tipos de presas según la normativa	31
2.3.1 Presas según su tamaño o dimensiones	31
2.3.2 Presas en función del riesgo potencial	31
2.4 Partes de las presas	33
2.5 Materiales de construcción para presas	36
2.5.1 Materiales de construcción para presas de fábrica	36
2.5.2 Materiales de construcción para presas de materiales sueltos	37
2.6 Presas en España	37
<b>Capítulo 3:</b>	38

3 La energía hidráulica. ....	39
3.1 Partes de las centrales hidroeléctricas. ....	40
3.1.1 Elementos de retención y almacenaje de agua. ....	40
3.1.2 Elementos de evacuación de caudales. ....	40
3.1.3 Elementos de conducción del agua. ....	41
3.1.4 Edificio de la central. ....	42
3.1.5 Rejas y limpiarrejas. ....	42
3.1.6 Elementos de apertura y cierre del paso de agua. ....	43
3.1.7 Equipamiento eléctrico. ....	43
3.1.8 Equipamiento hidráulico. ....	43
3.2 Funcionamiento y elementos de las turbinas. ....	44
3.2.1 Turbinas Pelton. ....	45
3.2.2 Turbinas Ossberger. ....	46
3.2.3 Turbinas Francis. ....	46
3.2.4 Turbinas Kaplan. ....	47
3.3 Selección de la turbina. ....	47
3.4 Cavitación. ....	49
<b>Capítulo 4:</b> .....	50
4 Descripción general de la central de Aguayo. ....	51
4.1 Acontecimientos históricos. ....	58
4.2 Ampliación de la central hidroeléctrica de Aguayo. ....	59
4.3 Central Torina. ....	59
<b>Capítulo 5:</b> .....	62
5 Objetivos y metodología. ....	63
5.1 Matlab GUIDE. ....	63
5.2 Partes de la central hidroeléctrica de Aguayo. ....	64
5.3 Potencia. ....	65
5.4 Energía producida y horas equivalentes. ....	66

5.5 Altura del salto de agua. ....	68
5.5.1 Pérdidas de carga. ....	68
5.6 Caudal. ....	70
5.7 Lógica difusa. ....	71
5.7.1 Rendimientos Fuzzy. ....	72
5.7.2 Altura del salto Fuzzy. ....	73
5.8 Demanda eléctrica. ....	77
5.8.1 Consumo energético. ....	78
5.9 Estación meteorológica. ....	80
5.10 Control de los depósitos. ....	84
5.10.1 Caudal Torina. ....	84
5.10.2 Evaporación. ....	86
5.10.3 Precipitación. ....	87
5.10.4 Movimiento de agua entre depósitos. ....	88
5.10.4.1 Bitrasvase del Ebro. ....	90
5.10.4.2 Trasvase. ....	91
5.10.4.3 Cuenca del Besaya. ....	91
5.11 Apertura válvulas. ....	92
5.12 Fichero de registro. ....	94
5.13 Instalación eléctrica y funcionamiento. ....	95
<b>Capítulo 6:</b> .....	99
6 Aplicación. ....	100
6.1 Estudio económico. ....	101
<b>Capítulo 7:</b> .....	102
7 Guía del usuario. ....	103
7.1 Descripción del funcionamiento. ....	103
7.2 Funcionamiento en modo automático. ....	104
7.3 Funcionamiento en modo manual. ....	109

7.4 Desplegables.....	112
<b>Capítulo 8:</b> .....	114
8 Conclusiones. ....	115
<b>Capítulo 9:</b> .....	116
9 Bibliografía. ....	117
<b>Capítulo 10:</b> .....	119
10 Anejo de programación.....	120
10.1 Inicialización.....	121
10.2 Modo automático.....	130
10.2.1 Control automático. ....	131
10.3 Modo manual. ....	134
10.3.1 Control Manual. ....	136
10.4 Funciones complementarias.....	140
10.4.1 Lectura del fichero de Aguayo. ....	140
10.4.2 Panel estación meteorológica.....	143
10.4.3 Evaporación.....	146
10.4.4 Precipitación.....	146
10.4.5 Límites depósitos. ....	147
10.4.6 Límites caudales. ....	148
10.4.7 Panel apertura válvulas.....	148
10.4.8 Panel Caudales. ....	149
10.4.9 Textos y gráficas del control automático. ....	149
10.4.10 Gráficas demanda eléctrica. ....	152
10.4.11 Fichero de escritura de datos. ....	152
10.4.12 Interacción con el usuario. ....	153
10.4.13 Textos y gráficas del control manual. ....	154
10.5 Interfaz Matlab GUIDE.....	157
10.6 Generador de la demanda eléctrica. ....	158

## Índice de figuras.

<b>Figura 1.1.</b> Vista aérea del embalse de Alsa.....	17
<b>Figura 1.2.</b> Energía renovable sobre el total de la producción. ....	18
<b>Figura 1.3.</b> Potencia eólica instalada en España. ....	19
<b>Figura 1.4.</b> Potencia hidráulica instalada en España por comunidades autónomas. ....	20
<b>Figura 1.5.</b> Potencia solar fotovoltaica instalada en España. ....	20
<b>Figura 2.1.</b> Esquema de la clasificación de las presas.....	23
<b>Figura 2.2.</b> Representación del empuje del agua y el peso de la presa.....	24
<b>Figura 2.3.</b> Presa de gravedad del embalse de Gabriel y Galán en Extremadura. ....	25
<b>Figura 2.4.</b> Presa de gravedad aligerada en Roselend (Francia).....	25
<b>Figura 2.5.</b> Distribución de las fuerzas en una presa de arco. ....	26
<b>Figura 2.6.</b> Presa Casasola (España) de arco-gravedad. ....	26
<b>Figura 2.7.</b> Presa Almendra (España) y Quentar (España) de bóveda. ....	27
<b>Figura 2.8.</b> Presa Fumadinha (Portugal) y Daniels (Canadá) de bóvedas múltiples. ....	27
<b>Figura 2.9.</b> Distribución de las fuerzas en una presa de materiales sueltos.....	28
<b>Figura 2.10.</b> Sección de una presa homogénea de materiales sueltos. ....	29
<b>Figura 2.11.</b> Presa homogénea de materiales sueltos de Guadalhorce.....	29
<b>Figura 2.12.</b> Sección de una presa de núcleo materiales sueltos. ....	29
<b>Figura 2.13.</b> Presa de núcleo de arcilla de materiales sueltos de Jarrama (España).....	30
<b>Figura 2.14.</b> Sección de una presa de pantalla de materiales sueltos. ....	30
<b>Figura 2.15.</b> Presa de pantalla de materiales sueltos de Bennett (Canadá). ....	31
<b>Figura 2.16.</b> Clasificación de los daños materiales. ....	32
<b>Figura 2.17.</b> Clasificación de las presas y balsas de competencia estatal.....	33
<b>Figura 2.18.</b> Presa de El Atazar (España).....	33
<b>Figura 2.19.</b> Pisado y cubrimiento de un talud. ....	34
<b>Figura 2.20.</b> Aliviadero de la presa de Compuerto (España) y presa de Monticello (California). ....	34
<b>Figura 2.21.</b> Desagüe de fondo y de medio fondo. ....	35
<b>Figura 2.22.</b> Compuertas de movimiento vertical. ....	35
<b>Figura 3.1.</b> Transformación de la energía hidráulica en una central hidroeléctrica. ....	39
<b>Figura 3.2.</b> Esquema de un Azud.....	40



<b>Figura 3.3.</b> Esquema de un canal de derivación. ....	41
<b>Figura 3.4.</b> Chimenea de equilibrio de la presa de Bolarque (España). ....	42
<b>Figura 3.5.</b> Sistema de rejas y limpiarrejas. ....	42
<b>Figura 3.6.</b> Partes más representativas que componen una turbina. ....	44
<b>Figura 3.7.</b> Distribuidor de una turbina Pelton. ....	44
<b>Figura 3.8.</b> Turbina hidráulica Pelton. ....	45
<b>Figura 3.9.</b> Turbina hidráulica Ossberger. ....	46
<b>Figura 3.10.</b> Turbina hidráulica Francis. ....	47
<b>Figura 3.11.</b> Turbina hidráulica Kaplan. ....	47
<b>Figura 3.12.</b> Elección de la turbina según la altura del salto y la velocidad específica. ....	48
<b>Figura 3.13.</b> Relación entre la presión de vapor de agua y la temperatura. ....	49
<b>Figura 4.1.</b> Situación de los embalses que forman parte de la central de Aguayo. ....	51
<b>Figura 4.2.</b> Plano de situación del embalse de Alsa (Fuente: Electra de Viesgo). ....	52
<b>Figura 4.3.</b> Vista satélite del embalse de Mediajo. ....	52
<b>Figura 4.4.</b> Presa superior (Fuente: Electra de Viesgo). ....	53
<b>Figura 4.5.</b> Depósito inferior (Fuente: Electra de Viesgo). ....	53
<b>Figura 4.6.</b> Situación de la presa de Alsa y Matahoz. ....	54
<b>Figura 4.7.</b> Presa de Alsa. ....	54
<b>Figura 4.8.</b> Contrapresa de Matahoz (Fuente: Electra de Viesgo). ....	55
<b>Figura 4.9.</b> Los cuatro generadores de la central hidroeléctrica de Aguayo. ....	55
<b>Figura 4.10.</b> Central de Aguayo con el conexionado de tuberías entre el embalse inferior-central-embalse superior. ....	56
<b>Figura 4.11.</b> Presa y central de Alsa (Fuente: Electra de Viesgo). ....	57
<b>Figura 4.12.</b> Esquema del salto (Fuente: Electra de Viesgo). ....	58
<b>Figura 4.13.</b> Tuberías de alta presión que unen la central con el depósito de Mediajo a 1290 metros. ....	58
<b>Figura 4.14.</b> Ampliación de la central de Aguayo. ....	59
<b>Figura 4.15.</b> Vista satélite del embalse de Alsa, embalse de Mediajo y las centrales de Aguayo y Torina. ....	60
<b>Figura 4.16.</b> La central eléctrica de Torina con las turbinas en verde y los alternadores en azul. ....	60
<b>Figura 4.17.</b> Sala de control. ....	61

<b>Figura 5.1.</b> Interfaz gráfica de control del embalse de Alsa.....	64
<b>Figura 5.2.</b> Balance generación Cantabria 2017 (Fuente: Red Eléctrica de España). ....	67
<b>Figura 5.3.</b> Cambio en el diámetro de las tuberías.....	69
<b>Figura 5.4.</b> Curva caudal - rendimiento. ....	71
<b>Figura 5.5.</b> Diagrama de bloques del sistema. ....	72
<b>Figura 5.6.</b> Curvas de pertenencia. ....	72
<b>Figura 5.7.</b> Reglas de pertenencia. ....	72
<b>Figura 5.8.</b> Comparación del resultado de la curva de rendimiento respecto a la realidad. ....	73
<b>Figura 5.9.</b> Perfil embalse de Alsa con forma de “cuenco”.....	73
<b>Figura 5.10.</b> Diagrama de bloques del sistema. ....	74
<b>Figura 5.11.</b> Curvas de pertenencia del nivel del depósito.....	74
<b>Figura 5.12.</b> Curvas de pertenencia de la altura de la lámina superior de agua. ....	74
<b>Figura 5.13.</b> Reglas de pertenencia. ....	74
<b>Figura 5.14.</b> Representación gráfica de la variación entre el nivel del depósito y el nivel del agua. ..	75
<b>Figura 5.15.</b> Diagrama de bloques del sistema. ....	75
<b>Figura 5.16.</b> Curvas de pertenencia del nivel del depósito.....	75
<b>Figura 5.17.</b> Curvas de pertenencia de la altura de la lámina superior de agua. ....	76
<b>Figura 5.18.</b> Reglas de pertenencia. ....	76
<b>Figura 5.19.</b> Representación gráfica de la variación entre el nivel del depósito y el nivel del agua. ..	76
<b>Figura 5.20.</b> Bombeo de ciclo semanal (Fuente: Centrales eléctricas I, Ángel Luis Orille). ....	78
<b>Figura 5.21.</b> Demanda energética española media por horas.....	78
<b>Figura 5.22.</b> Demanda energética del modelo. ....	79
<b>Figura 5.23.</b> Menú de control del Embalse.....	80
<b>Figura 5.24.</b> Fichero de datos de la estación de Aguayo. ....	81
<b>Figura 5.25.</b> Menú de control del Embalse.....	82
<b>Figura 5.26.</b> Imagen que muestra si es día o de noche. ....	82
<b>Figura 5.27.</b> Iconos que indican la situación meteorológica. ....	82
<b>Figura 5.28.</b> Iconos que indican una posible situación meteorológica adversa.....	83
<b>Figura 5.29.</b> Panel de la estación meteorológica. ....	83
<b>Figura 5.30.</b> Modelo de los movimientos de agua para ambos depósitos.....	84

<b>Figura 5.31.</b> Senda fluvial del río Torina y ubicación.....	85
<b>Figura 5.32.</b> Tubería de toma del canal del Torina de la presa de Alsa (Fuente: Electra de Viesgo). 85	
<b>Figura 5.33.</b> Aportación del embalse de Alsa al canal del Torina según la época del año.....	86
<b>Figura 5.34.</b> Variación del coeficiente $C_m$ mensual. ....	86
<b>Figura 5.35.</b> Variación de la insolación media mensual. ....	87
<b>Figura 5.36.</b> Actualización de los niveles de los depósitos con tiempo de muestreo 15 minutos.....	89
<b>Figura 5.37.</b> Menú de control del Embalse.....	89
<b>Figura 5.38.</b> Panel “caudales”. ....	89
<b>Figura 5.39.</b> Sistema de abastecimiento previo a la autovía del agua. ....	90
<b>Figura 5.40.</b> Sistema de abastecimiento de agua en Cantabria en la actualidad (Fuente: Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria). ....	90
<b>Figura 5.41.</b> Efecto de la recuperación sobre el río Pas. ....	91
<b>Figura 5.42.</b> Opción de trasvase. ....	91
<b>Figura 5.43.</b> Opción de la cuenca Besaya.....	92
<b>Figura 5.44.</b> Ejemplo del funcionamiento de la carga y la apertura de la válvula.....	92
<b>Figura 5.45.</b> Panel de la apertura de las válvulas. ....	93
<b>Figura 5.46.</b> Barra deslizante y caja de interacción para la regulación de la carga en modo manual.94	
<b>Figura 5.47.</b> Fichero de registro. ....	95
<b>Figura 5.48.</b> Gráfico del funcionamiento económico de una central de bombeo (Fuente: Centrales eléctricas I, Ángel Luis Orille).....	96
<b>Figura 5.49.</b> Esquema unifilar de la central de Aguayo (Fuente: Electra de Viesgo). ....	97
<b>Figura 6.1.</b> Logo desarrollado para la aplicación.....	100
<b>Figura 7.1.</b> Pantalla principal de ejecución del programa.....	103
<b>Figura 7.2.</b> Pantalla de control en modo automático. ....	104
<b>Figura 7.3.</b> Diferentes estados de la pantalla de control en modo automático. ....	105
<b>Figura 7.4.</b> Panel de la estación meteorológica. ....	105
<b>Figura 7.5.</b> Diferentes momentos de tiempo de la estación meteorológica. ....	106
<b>Figura 7.6.</b> Panel con la apertura de las válvulas.....	106
<b>Figura 7.7.</b> Panel caudales.....	107
<b>Figura 7.8.</b> Diferentes momentos de la pestaña caudales. ....	107
<b>Figura 7.9.</b> Panel del histórico de la demanda eléctrica.....	107

<b>Figura 7.10.</b> Diferentes demandas eléctricas en días laborables.....	108
<b>Figura 7.11.</b> Distribución de todos los paneles activados simultáneamente. ....	108
<b>Figura 7.12.</b> Pantalla de control en modo manual.....	109
<b>Figura 7.13.</b> Utilización de la barra deslizante superior.....	110
<b>Figura 7.14.</b> Apertura de la válvula inferior mediante la caja.....	111
<b>Figura 7.15.</b> Central funcionando con la opción trasvase activada. ....	111
<b>Figura 7.16.</b> Desembalse hacia la cuenca del Besaya.....	112
<b>Figura 7.17.</b> Error de programa no arrancado.....	112
<b>Figura 7.18.</b> Pestañas del fichero de escritura y ayuda. ....	113

## **SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL DEL NIVEL DE AGUA DEL EMBALSE DE ALSA**

### **RESUMEN**

En este trabajo se va a realizar un modelo de control del nivel del agua de la central hidroeléctrica de Aguayo, perteneciente a Repsol y situada en la comunidad autónoma de Cantabria. Esta central está formada por un sistema de doble embalse; el inferior, el embalse de Alsa desde donde se bombea y el superior, embalse de Mediajo desde donde se turбина.

Utilizando la herramienta de Matlab, Matlab GUIDE, se realizará el control y monitorización de la central mediante una interfaz gráfica que permita tener una visión general de la situación en tiempo real del nivel de agua de los embalses, caudales, aperturas de las válvulas, producción o gasto energético del sistema. Se permitirán dos modos de funcionamiento; uno automático y otro manual donde el usuario podrá interactuar de forma directa con la estación.

## **MONITORING AND CONTROL SYSTEM OF THE WATER LEVEL IN THE ALSA RESERVOIR**

### **SUMMARY**

This work on a model of water level control of the Aguayo hydroelectric plant, property of Repsol and located in the community of Cantabria. This plant has a double reservoir system; the lower one, the Alsa reservoir from where it is pumped and the upper one, the Mediajo reservoir from where it is turbine.

Using the Matlab tool, Matlab GUIDE, the control and monitoring of the plant will be executed through a graphical interface that will allow having a general view of the situation in real time of the water level of the reservoirs, flows, valve openings, production or energy expenditure of the system. There are two modes of operation; an automatic one and a manual one where the user can directly interact with the station.

# Capítulo 1: **LA GENERACIÓN DE ENERGÍA**

# 1 La generación de energía.

En este primer capítulo se va a realizar una introducción sobre el tipo de consumo y producción de la energía eléctrica en nuestro país. Haciendo especial hincapié en las energías renovables como una de las más importantes soluciones contra la creciente huella de carbono.

## 1.1 Objeto del trabajo.

La climatología provoca irregularidades en los caudales de los ríos de la Península Ibérica, haciendo necesario regular estos construyendo presas e inundando valles para satisfacer la demanda hídrica y al mismo tiempo generar electricidad. De esta forma aparecieron los primeros embalses, encargados de almacenar agua que se podrá destinar a diferentes usos, como el abastecimiento a industrias, ciudades, control de avenidas, riego y recreación principalmente.

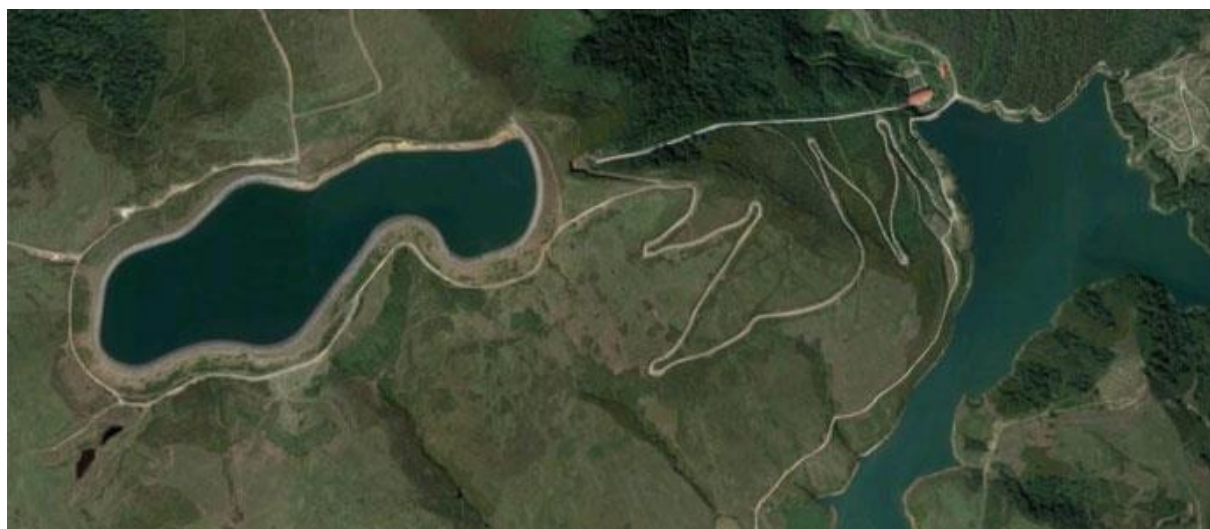
Las necesidades de agua para regadío y abastecimiento tienen mayor peso sobre el aprovechamiento hidroeléctrico y además este último se puede utilizar como refrigerante en centrales térmicas y nucleares. En la mayoría de los casos, se utiliza el uso múltiple de regadío y aprovechamiento hidroeléctrico, para generar energía en horas punta cuando la demanda eléctrica es mayor.

Las centrales hidroeléctricas reversibles son un gran elemento para actuar como centrales de punta cuando la demanda exceda la oferta de energía y como bomba almacenando la energía cuando la oferta sobrepasa a la demanda.

En este trabajo se va a realizar un modelo de control del nivel del agua de la central hidroeléctrica de Aguayo, perteneciente a Repsol y situada en la comunidad autónoma de Cantabria. Esta central está formada por un sistema de doble embalse; el inferior, el embalse de Alsa desde donde se bombea y el superior, embalse de Mediajo desde donde se turbinan. Estos embalses puedes observarse en la Figura 1.1.

Utilizando la herramienta de Matlab [7], Matlab GUIDE, se realizará el control y monitorización de la central mediante una interfaz gráfica que permita tener una visión general de la situación en tiempo real del nivel de agua de los embalses, caudales, aperturas de las válvulas, producción o gasto energético del sistema. Se permitirán dos modos de funcionamiento; uno automático y otro manual donde el usuario podrá interactuar de forma directa con la estación.





**Figura 1.1.** Vista aérea del embalse de Alsa.

## 1.2 La energía en España.

En el año 1901, año en el que se publicó la primera estadística oficial, toda la electricidad generada era de corriente continua y no se podía transportar en largas distancias. Además, el 61% de la potencia instalada en España era de origen térmico y el 39% restante provenía de la energía hidráulica.

A principios del siglo XX [19], apareció la corriente eléctrica alterna, lo que permitía transportarla a largas distancias. Para producir la electricidad necesaria se llevó a cabo un desarrollo a gran escala de las centrales hidroeléctricas, de forma que a finales de los años veinte, la potencia instalada eran 1500MW, de donde 1215MW provenían de la energía hidroeléctrica.

Los años de la guerra civil y las sequías de 1944 y 1945 provocaron el estancamiento de la construcción de nuevas centrales. Para solucionar esta situación, en 1944 se fundó la empresa Unidad Eléctrica S.A. (UNESA) que, junto con la implantación de las tarifas en 1953, se retomó el modelo expansivo de construcción de centrales, hasta el punto, en que se convirtió en un factor muy importante del PIB nacional.

En 1970, la potencia instalada rozaba los 17.925MW y la producción anual superaba los 56.500GWh. Este gran aumento de la demanda, implicó un importante cambio en la estructura de la generación apostando por el petróleo y gas. Tal fue su contribución, que la energía hidroeléctrica paso de aportar el 84% del total en 1960 al 50% en 1970.

Para compensar esta creciente demanda y estabilizar la situación económico-financiera de las empresas, en 1988, se introdujo un Marco Legal y Estable, un nuevo sistema de cálculo

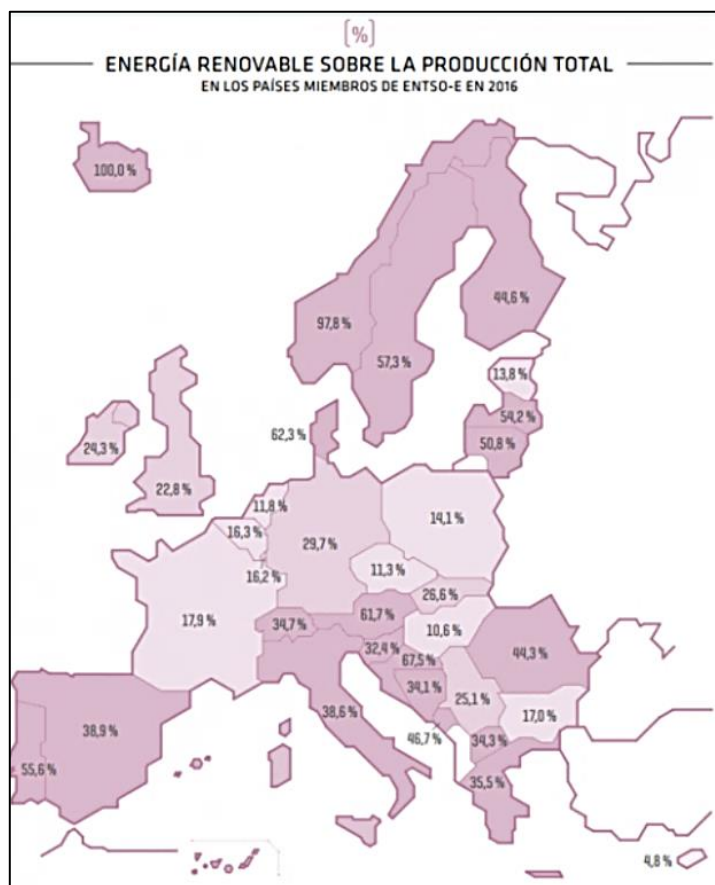
de las tarifas eléctricas para disminuir los desequilibrios de la demanda e introducir un sistema de costes de producción y distribución que corregiría las desviaciones al final del año.

Posteriormente, en 1996 y como consecuencia de la Directiva europea del nuevo mercado de la electricidad, en 1998 entró en vigor una nueva normativa para el sector eléctrico, la cual introdujo unos grandes cambios, aunque en 2013 fue derogada.

En el siglo XXI, la red eléctrica española se enfrenta a muchos retos, entre los que destacan:

- El paso a un nuevo modelo de producción a partir de fuentes renovables.
- Disminución de las pérdidas durante el transporte.
- Nuevos puntos de recarga para el transporte eléctrico.

Hoy en día, España es un país fuertemente dependiente de las importaciones energéticas, donde el sector de la energía aporta alrededor de un 2.5% del PIB [18]. Esta dependencia alcanzó su máximo en 2015, cuando llegó a alcanzar un 76.1% e implicó un coste de 26.000 millones de euros.



**Figura 1.2.** Energía renovable sobre el total de la producción.

Para asegurar un suministro estable, sin la necesidad de importaciones de energía, es necesario potenciar los recursos autóctonos que poseemos, sobre todo los renovables; sol, viento y agua.

La gran mayoría de la energía primaria utilizada en España proviene de combustibles fósiles muy contaminantes (petróleo, carbón y gas), donde habría que añadir la generación nuclear que, aunque sea menos contaminante, los residuos radioactivos generados son altamente peligrosos.

Debido al compromiso acordado en el congreso sobre el cambio climático de París (COP21), es indispensable volcar todos los esfuerzos en las energías renovables, no solo para no ser sancionados, sino para reducir la huella de carbono producida por nuestro país.

A nivel europeo, el porcentaje de energía renovable sobre la producción total de cada país, puede verse en la figura 1.2.

### 1.3 La energía eólica.

En nuestro país, la energía eólica constituye la principal fuente de energía renovable, con una potencia instalada en 2019 de 25.704MW. La energía eólica ha sido la energía principal, debido a su regularidad ya que no depende tanto de las condiciones meteorológicas y su producción es mucho más constante. En la Figura 1.3. se muestra la potencia eólica instalada entre los años 1998 y 2019.

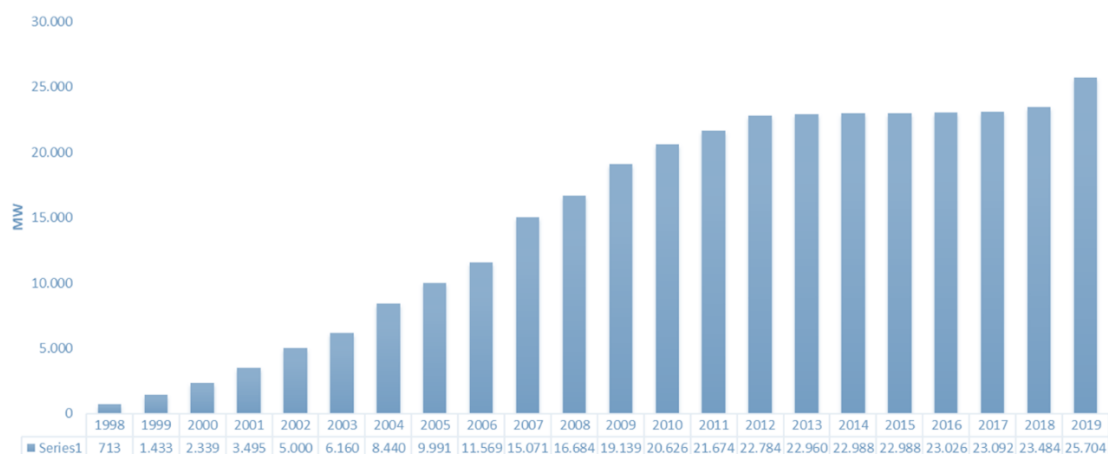


Figura 1.3. Potencia eólica instalada en España.

### 1.4 La energía hidráulica.

La energía hidráulica es la segunda fuente renovable de generación eléctrica en España con una potencia instalada de 17.083MW (2019). Esta energía, es la energía más consolidada y con mayor grado de madurez, debido al aprovechamiento de la orografía y a la existencia de un gran número de centrales hidroeléctricas. En la Figura 1.4 se muestra la potencia instalada en cada comunidad autónoma.

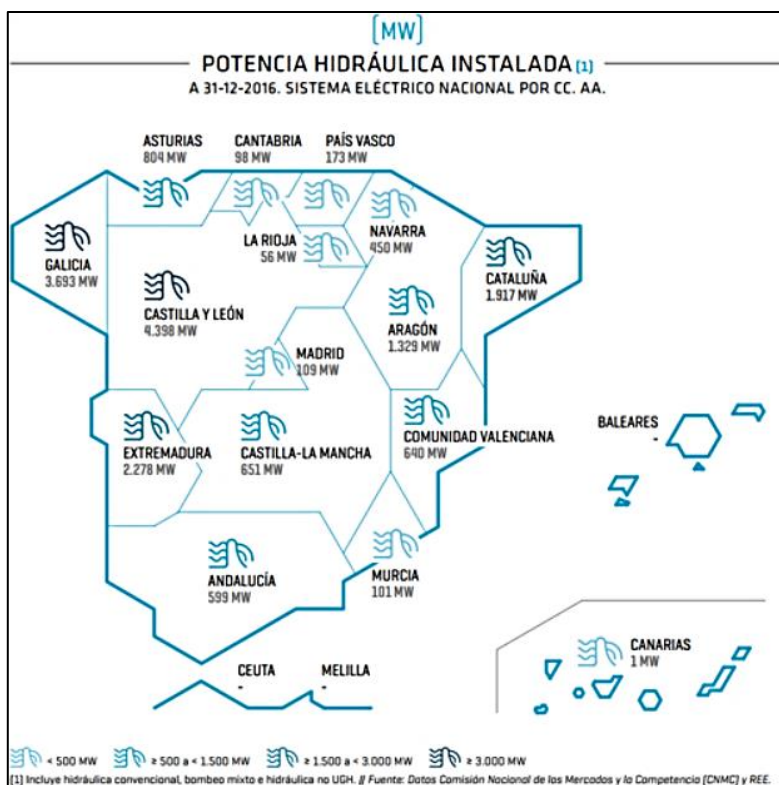


Figura 1.4. Potencia hidráulica instalada en España por comunidades autónomas.

## 1.5 La energía fotovoltaica.

Por último, la energía solar representa la tercera fuente renovable de generación eléctrica en España con 7.800MW (2019). Esta energía es una de las que mayor futuro tiene en nuestro país, ya que somos uno de los países con mayor cantidad de horas de luz de toda Europa. En la figura 1.5. se puede observar la variación de la potencia instalada en España.

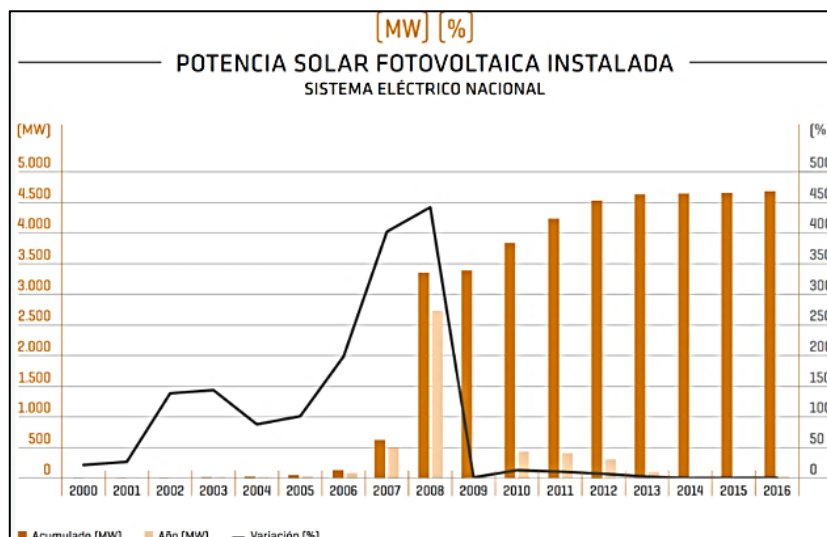


Figura 1.5. Potencia solar fotovoltaica instalada en España.

## **1.6 Disposición del trabajo.**

El resto del trabajo se ha estructurado de la siguiente manera; en el capítulo 2, se describe a grandes rangos los tipos de presas, en el capítulo 3, se informa acerca de las centrales hidroeléctricas y los tipos de turbinas. Estos dos capítulos contienen los conocimientos previos necesarios para la correcta comprensión de este trabajo.

En los siguientes capítulos, se empieza a describir el propósito de este proyecto. En el capítulo 4, se realiza una descripción de las características físicas y del funcionamiento de la central hidroeléctrica de Aguayo. En el capítulo 5, se informa de los pasos empleados para completar dicho proyecto.

En el capítulo 6, se explica la conversión del programa en una aplicación independiente de Matlab junto con un estudio económico del proyecto. El capítulo 7 trata de informar al usuario acerca de cómo utilizar el programa desarrollado y comprender la información que se muestra.

En el capítulo 8, se indican las conclusiones llegadas una vez completado el trabajo. En el capítulo 9, se muestra la bibliografía empleada para el correcto desarrollo del proyecto.

Por último, en el capítulo 10, se enseña todo el código realizado para el correcto funcionamiento del programa utilizando Matlab.

# Capítulo 2:

# **TIPOS DE PRESAS**

## 2 Tipos de presas.

Las presas o represas [4] son una o varias barreras hechas de piedra, hormigón o materiales sueltos, que se construyen principalmente en un cuello de botella o desfiladero de un río.

Los tipos de presas se pueden clasificar atendiendo a los siguientes criterios:

- Según el material.
- Según su morfología y la forma de resistir los esfuerzos.
- Según su tamaño.
- Según el riesgo potencial.

Tipos de presas	Según su material de fabricación	De fábrica	Gravedad	Macizas Aligeradas
			Arco	Arco Bóveda
			Arco Gravedad Bóvedas múltiples	
	Según su normativa	De materiales sueltos	Homogéneas Heterogéneas o de núcleo De pantalla o diagrama	
		Según su tamaño	Grandes presas Pequeñas presas	
		Según el riesgo de rotura	Categoría A Categoría B Categoría C	

**Figura 2.1.** Esquema de la clasificación de las presas.

Las presas pueden ser construidas por diferentes materiales, entre los que destacan las tierras, el hormigón y la escollera. La Figura 2.1 muestra un esquema de la clasificación de las presas.

### 2.1 Presas de hormigón o de fábrica.

Este tipo de presas son capaces de resistir grandes esfuerzos tanto a tracción como a compresión y la gran mayoría de ellas están construidas en hormigón.

Las principales ventajas que puede ofrecer una de estas presas son:

- Resistencia.

- Vertido por coronación. Existe un menor riesgo de arrastre de material, por lo que se puede permitir el vertido por coronación.
- Disposición de los aliviaderos y desagües. Al permitirse el vertido por coronación la libertad para la colocación de los aliviaderos y desagües es mucho mayor.
- Menor volumen. Es necesario un menor volumen de material y por lo tanto se ocupa un espacio menor.
- Unidad de materiales. El hormigón cumple la función tanto de material resistente como impermeable.

Por otro lado, entre los mayores inconvenientes se encuentran:

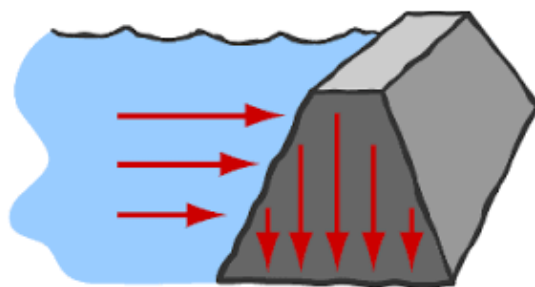
- El hormigón se puede fracturar. El hormigón, es un material con muy poca flexibilidad y se adapta bastante mal a los asentamientos del terreno que se producen con el tiempo, lo cual puede dar lugar a filtraciones y en el peor de los casos a una ruptura.
- El hormigón tiene un precio bastante mayor respecto a otros materiales, como la tierra o la roca.
- Gran impacto ambiental.

Dentro de las presas de hormigón, los diseños que se llevan a cabo cambian según la forma o morfología de la estructura, de esta forma se pueden distinguir los siguientes tipos:

- Presas de gravedad.
- Presas de arco.

### 2.1.1 Presas de gravedad.

En este tipo de presas el empuje generado por el agua almacenada es contrarrestado por el propio peso de la estructura y su disposición, de forma que venza la resistencia al deslizamiento. Es fundamental para evitar que la presa vuelque, que la línea de acción provocada por el peso de la presa se encuentre en su base. La Figura 2.2 representa el empuje del agua y el peso de la presa.



**Figura 2.2.** Representación del empuje del agua y el peso de la presa.



En cuanto a su construcción, existen dos principales métodos; el hormigón vibrado, que es el método tradicional y el compactado por rodillo (HCR). En cuanto a las dimensiones, la anchura de la base suele ser un 80% de la altura de la presa.

Estas presas pueden ser de dos tipos:

- Presas macizas. Sin huecos excepto los formados por las tomas y desagües. La Figura 2.3 muestra una presa maciza de gravedad.



**Figura 2.3.** Presa de gravedad del embalse de Gabriel y Galán en Extremadura.

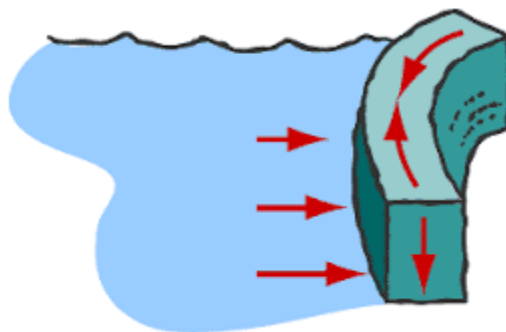
- Presas aligeradas. Su funcionamiento es igual al de una presa de gravedad habitual, pero son planas de la corona a la base, aunque cuenta con unas colas que sujetan la presa. Debido a esto, se utiliza entre un 15 y 25% menos de hormigón que las presas macizas, pero su complejidad en el diseño y actuación hacen que el ahorro económico normalmente sea nulo, por lo que a día de hoy es una técnica en desuso. La Figura 2.4 muestra una presa aligerada.



**Figura 2.4.** Presa de gravedad aligerada en Roselend (Francia).

### 2.1.2 Presas de arco.

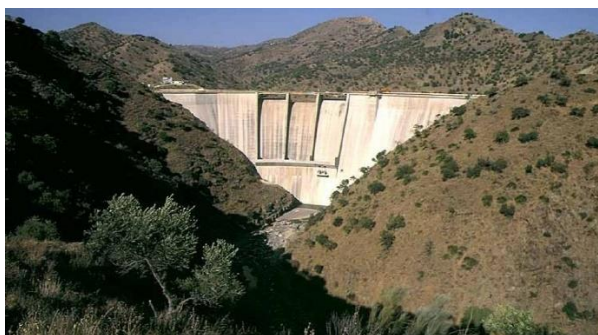
Las presas de arco son llamadas así por la curvatura que poseen, de esta forma el empuje que genera el agua es mandado hacia las laderas donde se encuentra. Si la curvatura es horizontal, se denominan presas de bóveda, si es doble, es decir, si la curvatura es horizontal y vertical, son conocidas como presas cúpula. La Figura 2.5 muestra la distribución de las fuerzas de una presa de arco.



**Figura 2.5.** Distribución de las fuerzas en una presa de arco.

Aunque este método permite un uso de menos del 50% de hormigón respecto a las presas de gravedad, su aplicación es mucho más exigente y sensible y no siempre se pueden aplicar. Las características principales de los tipos de presas de arco son:

- Presa arco-gravedad. Se encuentran a medio camino entre las de gravedad y de arco y aunque el arco que lo forma no es suficiente para contrarrestar el empuje, sí que permite eliminar algo de peso, es decir, el esfuerzo a soportar se reparte entre el cimientado y los estribos laterales. Para ello, es muy importante la capacidad resistente de los estribos y el material de las laderas de la cerrada. La Figura 2.6 muestra una presa de arco-gravedad.



**Figura 2.6.** Presa Casasola (España) de arco-gravedad.

- Presa de bóveda. Su disposición permite transmitir el esfuerzo hacia los apoyos laterales y el fondo debido a su forma curva. En la figura 2.7 se pueden observar dos presas con forma de bóveda.



**Figura 2.7.** Presa Almendra (España) y Quentar (España) de bóveda.

- Presa de bóvedas múltiples. Al igual que las presas de pantalla plana, pero con la ventaja de que, si se separan los contrafuertes de forma de bóveda, se consigue disminuir notablemente el volumen de hormigón necesario.

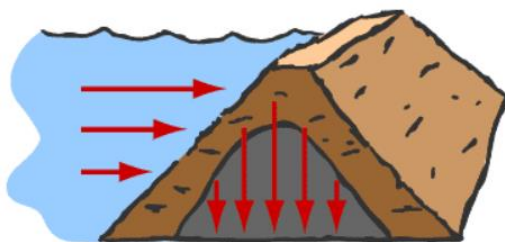
Este tipo de presas son más esbeltas que las de gravedad, permitiendo que la base sea en torno al 40% de la altura de la presa. En la Figura 2.8 se muestran dos presas de bóvedas múltiples.



**Figura 2.8.** Presa Fumadinha (Portugal) y Daniels (Canadá) de bóvedas múltiples.

## 2.2 Presas de materiales sueltos.

Las presas de materiales sueltos [3] permiten su construcción con una gran variedad de materiales, por lo que son las más abundantes del mundo. El cuerpo de estas presas se construye utilizando materiales naturales como; gravas, rocas, arenas o arcillas. Tienen una sección trapezoidal y al poderse utilizar diferentes materiales, se utiliza el que se desempeña la mejor función en cada zona. En la Figura 2.9 se muestra un esquema con la distribución de las fuerzas de una presa de materiales sueltos.



**Figura 2.9.** Distribución de las fuerzas en una presa de materiales sueltos.

Sus principales ventajas son:

- A pesar de su gran tamaño, son más baratas que las presas de hormigón, puesto que los materiales utilizados son más baratos.
- Se pueden utilizar sobre cualquier tipo de terreno ya que no se generan grandes presiones.

En cambio, posee una serie de desventajas como:

- No se garantiza la permeabilidad del material que compone la presa, a diferencia de las presas de fábrica.
- Debido al punto anterior, es necesario la utilización de materiales impermeables como arcilla en puntos estratégicos para asegurar la impermeabilidad del embalse.

Según el material impermeable que se utilice se distingues tres grupos principales:

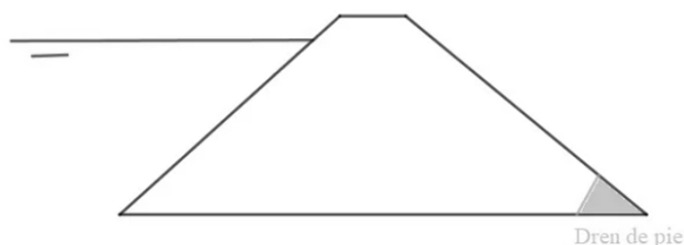
- Presas homogéneas.
- Presas de núcleo.
- Presas de pantalla.

A día de hoy, independientemente del tipo, las presas de materiales sueltos son las más utilizadas en el mundo debido a su gran capacidad de variabilidad.

### **2.2.1 Presas homogéneas.**

Las presas homogéneas usan el mismo material impermeable para todo el cuerpo de la presa, este material impermeable, en la inmensa mayoría de los casos está formada por arcillas compactadas. Debido a los coeficientes de rozamiento de estas arcillas especiales, el tamaño de la base de la presa es entre 6 y 8 veces su altura. En la Figura 2.10 se puede observar el esquema de la sección de una presa homogénea.





**Figura 2.10.** Sección de una presa homogénea de materiales sueltos.

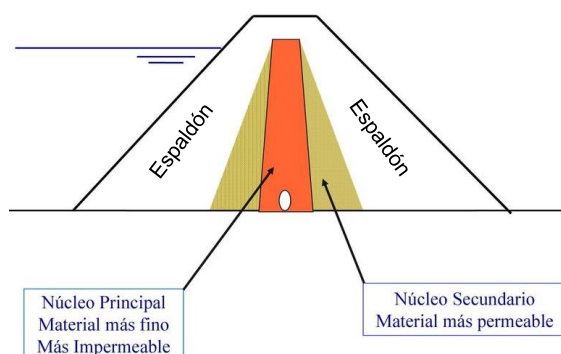
Sobre estas capas impermeables se añaden pequeños mantos de protección para cubrir y proteger la capa impermeable. En la Figura 2.11 se enseñan un par de presas homogéneas de materiales sueltos.



**Figura 2.11.** Presa homogénea de materiales sueltos de Guadalhorce.

### 2.2.2 Presas de núcleo.

El cuerpo de este tipo de presas está compuesto en su mayoría por materiales sueltos permeables colocados sobre un núcleo interior permeable. Dicho núcleo puede estar posicionado en la franja central de la presa o ligeramente inclinado. Todo el material permeable que se coloca a ambos lados del núcleo impermeable, se denomina espaldón. La Figura 2.12 describe la sección de una presa de núcleo de materiales sueltos.



**Figura 2.12.** Sección de una presa de núcleo materiales sueltos.

Además, los materiales que se utilizan que van desde el núcleo hasta la capa más externa del espaldón son materiales con granulometría intermedia, conocidos como materiales de transición, que son los encargados del filtraje y drenado. Los materiales más utilizados suelen ser tierra y escollera. En la Figura 2.13 se puede observar la construcción de una presa de núcleo de arcilla.

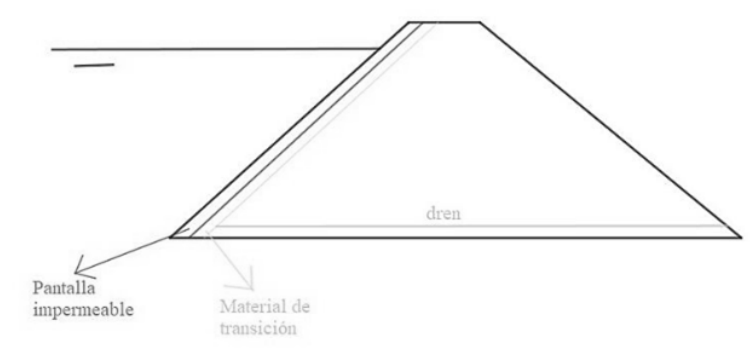


**Figura 2.13.** Presa de núcleo de arcilla de materiales sueltos de Jarrama (España).

### 2.2.3 Presas de pantalla.

La característica principal de estas presas es que poseen una pantalla impermeable que se apoya sobre el talud aguas arriba del cuerpo de la presa. Los materiales utilizados para la pantalla son múltiples, como, por ejemplo; hormigón (todo tipo de presas) de conglomerante hidráulico o semihidráulico, asfálticas (presas medianas y pequeñas) y plásticas (únicamente presas pequeñas).

En la Figura 2.14 se puede observar cómo debajo de la pantalla impermeable se suelen utilizar materiales de transición.



**Figura 2.14.** Sección de una presa de pantalla de materiales sueltos.

En cuanto al material utilizado para el cuerpo, la mayoría son de escollera, aunque también pueden ser de tierra. La Figura 2.15 muestra una presa de pantalla.



**Figura 2.15.** Presa de pantalla de materiales sueltos de Bennett (Canadá).

## 2.3 Tipos de presas según la normativa.

Tal y como se publicó en el Boletín Oficial del Estado el 14 de febrero de 1995 en el artículo 3.5.1.3 [1] es obligatorio que la presas se clasifiquen en categorías en función del riesgo potencial que pueda generar su rotura o funcionamiento incorrecto. En dicho documento se dictan los criterios fundamentales para su clasificación y el procedimiento a seguir.

De esta forma, todas las presas del país tienen que presentar un Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas. Se entenderá como presa *“aquella construcción artificial establecida en un cauce natural o fuera de él, capaz de retener agua u otros líquidos o semilíquidos y cuya rotura puede provocar daños a elementos distintos de la propia estructura [1].”*

### 2.3.1 Presas según su tamaño o dimensiones.

Se dividen en dos grupos:

- Grandes presas: *“según el Título VII del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, se considera gran presa aquella cuya altura es superior a 15 metros y la que, teniendo una altura comprendida entre 10 y 15 metros, tenga una capacidad de embalse superior a 1 hectómetro cúbico (1.000.000 de metros cúbicos) [1].”*
- Pequeñas presas: las que no cumplen las características anteriores.

### 2.3.2 Presas en función del riesgo potencial.

Hay tres categorías, de mayor riesgo a menor [2]:

- Categoría A: “Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, o producir daños materiales o medioambientales muy importantes [2].”
- Categoría B: “Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales o medioambientales importantes o afectar a un número reducido de viviendas [2].”
- Categoría C: “Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales o medioambientales de moderada importancia y solo incidentalmente pérdida de vidas humanas. En todo caso, a esta categoría pertenecerán todas las presas no incluidas en las Categorías A y B [2].”

Para conocer en que categoría se encuentra una presa, hay que analizar principalmente los siguientes aspectos:

- Riesgo potencial a vidas humanas.
  - Categoría A: Afectar a más de cinco viviendas habitadas.
  - Categoría B: Provocar daños entre 1 y 5 viviendas habitadas.
  - Categoría C: Presencia ocasional y no previsible de vidas humanas.
- Daños materiales. Son los daños cuantificables económicamente hablando ya sean directos o indirectos.
  - Daños a cultivos.
  - Daños a las infraestructuras.
  - Daños a industrias y polígonos industriales.
  - Daños a las propiedades rústicas.

Para cuantificar estos aspectos, se utiliza la siguiente Figura 2.16.

ELEMENTO	DAÑOS POTENCIALES		
	MODERADOS	IMPORANTES	MUY IMPORTANTES
Industrias y polígonos industriales y propiedades rústicas <sup>1</sup>	nº de instalaciones < 10	10 < nº de instalaciones < 50	nº de instalaciones > 50
Cultivos de secano	Superficie < 3.000 Has	3.000Has < superficie < 10.000Has	Superficie > 10.000 Has
Cultivos de regadío	Superficie < 1.000 Has	1.000Has < superficie < 5.000Has	Superficie > 5.000 Has
Carretera		Red general de las CC.AA. u otras redes de importancia equivalente	Red general del estado y red básica de las CC.AA.
Ferrocarriles		ff.cc. vía estrecha	ff.cc. vía ancha y alta velocidad

**Figura 2.16.** Clasificación de los daños materiales.



- Daños medioambientales. En este ámbito no solo se incluyen los posibles desperfectos causados al medioambiente sino también al patrimonio histórico-artístico.
- Afecciones a servicios esenciales. Aquellos que son indispensables para el correcto funcionamiento de las necesidades humanas y económicas.
  - Sistema de comunicaciones.
  - Sistema de transporte.
  - Abastecimiento y saneamiento.
  - Suministro de energía.
  - Sistema sanitario.

A día de hoy, en nuestro país, el número total de presas que se encuentra en cada grupo se muestra en la Figura 2.17.

Total de presas		
Categoría	Número	Porcentaje
Categoría A	743	46%
Categoría B	118	7%
Categoría C	762	47%
Total:	1623	

**Figura 2.17.** Clasificación de las presas y balsas de competencia estatal.

## 2.4 Partes de las presas.

Las partes más representativas de las presas son las siguientes:

- Estribos. Son las partes laterales de la presa y se encuentra en contacto con el material delimitante. La Figura 2.18 muestra los estribos de la presa de El Atazar.



**Figura 2.18.** Presa de El Atazar (España).

- Cimentación. Es la parte que se encarga de compensar el empuje del agua con su peso, razón por la que se encuentra en contacto con el suelo de forma directa.
- Talud. Es la superficie que delimita a la estructura a ambos lados de la presa, de forma que uno está en contacto con el agua y el otro con el exterior. En la Figura 2.19 se puede observar el recubrimiento de un talud.



**Figura 2.19.** Pisado y cubrimiento de un talud.

- Coronación. Es la parte más alta de la presa y no coincide con la cota máxima de almacén de líquido.
- Núcleo. En las presas de materiales sueltos, es la parte central del cuerpo de la presa. Véase la Figura 2.12.
- Espaldones. En las presas de materiales sueltos, es la parte del cuerpo de la presa que no es el núcleo, aunque solo las tienen las presas de materiales heterogéneos. Observar la Figura 2.12.
- Aliviadero. Es la estructura hidráulica por donde el agua fluye cuando el nivel de la presa supera su capacidad máxima. En presas de materiales sueltos, no puede colocarse en la parte superior a diferencia de las de gravedad. En la Figura 2.20 se pueden observar dos tipos de aliviaderos.

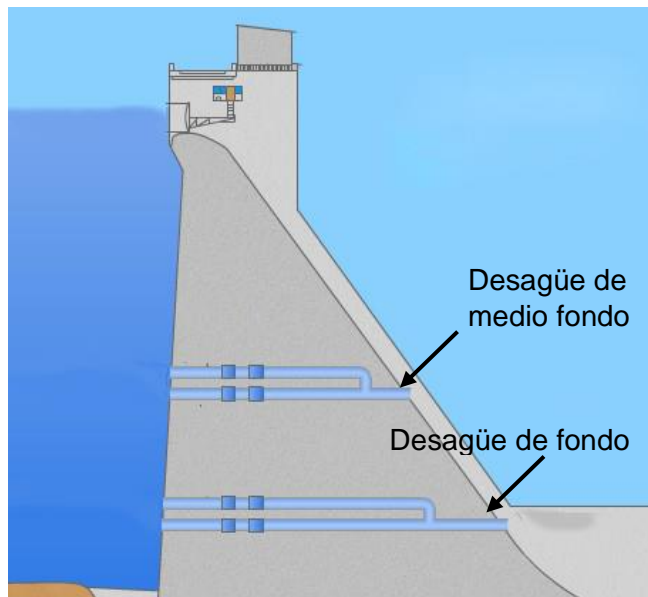


**Figura 2.20.** Aliviadero de la presa de Compuerto (España) y presa de Monticello (California).

- Desagües de fondo. Son los conductos que permiten desembalsar el líquido de la presa sin estar llena. Suelen atravesar la presa y poseer dos elementos de cierre para aumentar la seguridad. Existen dos tipos:

- Desagües de medio fondo.
- Desagües de fondo.

En la Figura 2.21 se pueden observar los dos tipos de desagües.



**Figura 2.21.** Desagüe de fondo y de medio fondo.

- Toma. Es la estructura hidráulica que permite extraer el agua de la presa para sus diferentes usos a través de la apertura de válvulas.
- Compuerta. Es el equipo que permite o corta el paso de agua a través de los conductos. En función de su movimiento, las compuertas pueden tener dos tipos de movimiento.
  - Movimiento vertical.
  - Movimiento horizontal.

En la Figura 2.22 se enseñan cuatro compuertas de movimiento vertical.



**Figura 2.22.** Compuertas de movimiento vertical.

- Elementos de drenaje y drenes. Los elementos de drenaje se encargan de recoger el agua que se encuentra dentro de la presa producido por las filtraciones a través de los drenes que son unos orificios verticales. En la inmensa mayoría de los casos, estos drenes tienen unos filtros para que no permitan el paso de partículas finas a través de ellas. Todo este líquido fluye a través de unas pequeñas galerías que se encuentran en el interior de la presa.

## **2.5 Materiales de construcción para presas.**

En función del tipo de presa que se quiera construir habrá que seleccionar entre distintos tipos de materiales.

### **2.5.1 Materiales de construcción para presas de fábrica.**

Los cuatro principios básicos que deben cumplir los materiales que se utilizan para este tipo de presas son la resistencia, la impermeabilidad, la durabilidad y la economía. Debido a que, cuando se fraguan grandes masas de hormigón, se desprende una gran cantidad de calor y se producen cambios considerables de temperatura que generan tensiones y deformaciones. Por esta razón, es clave utilizar el material adecuado en cada punto concreto para la correcta construcción de la presa.

Uno de los principales cambios para lograr esta disminución de calor emitida al fraguar el hormigón, es variar el tipo y dosificación del conglomerante para que esa disipación de calor no sea tan acusada. Además, es imprescindible que el conglomerante no cree pequeñas fisuras que puedan provocar la ruptura de la presa, para ello, se suelen utilizar cementos a base de Clinker y/o cenizas volantes y otros materiales puzolánicos en proporciones que rondan entre el 25% y 80% según el tipo de cemento.

Otra opción es el uso de hormigón compactado por rodillo (HCR) que permite una construcción más rápida y económica. La diferencia principal entre este material y el hormigón convencional es que se ahorra una gran cantidad de agua durante su amasado, lo que provoca una reducción de temperatura de fraguado y un menor riesgo de fisura.

### 2.5.2 Materiales de construcción para presas de materiales sueltos.

Para este tipo de presa, los materiales más utilizados son piedras, gravas, arenas, limos y arcillas, aunque destacan notablemente las piedras y gravas como los más utilizados.

Por otro lado, el material más utilizado como material impermeable es la arcilla, aunque todos estos materiales deben atenerse a unas preinscripciones básicas:

- Escollera. Serán necesarios la realización de ensayos para garantizar la resistencia mecánica a la acción del agua y su degradación por la actuación de los agentes atmosféricos.
- Tierras. Al igual que en el caso de la escollera, tendrán que someterse a una serie de ensayos para conocer sus características físicas y desecharlas en el caso de que su proporción de materia orgánica sea considerable.

## 2.6 Presas en España.

En España existen un total de 1538 presas, más de la mitad de ella son de fábrica y concretamente las de gravedad aportan el 53% del total. Respecto a los porcentajes que aportan cada tipo sobre el total:

- Arco gravedad: 48 (3,12%)
- Bóveda: 56 (3,64%)
- Bóvedas múltiples: 1 (0,07%)
- Contrafuertes: 31 (2,02%)
- Gravedad: 814 (52,93%)
- Gravedad y contrafuertes: 6 (0,39%)
- Gravedad y mampostería: 18 (1,11%)
- Hormigón armado: 4 (0,26%)
- Hormigón compactado: 22 (1,43%)
- Presas de materiales homogéneos: 268 (17,43 %)
- Presas de núcleo de arcilla: 134 (8,71 %)
- Presas con pantalla asfáltica: 21 (1,37 %)
- Presas con pantalla de hormigón: 37 (2,41 %)
- Presas con pantalla en lámina: 13 (0,85 %)
- Presas de materiales sueltos y mampostería: 5 (0,33%)
- Presas zonificadas: 7 (0,46%)

# Capítulo 3:

# **LA ENERGÍA**

# **HIDRÁULICA**

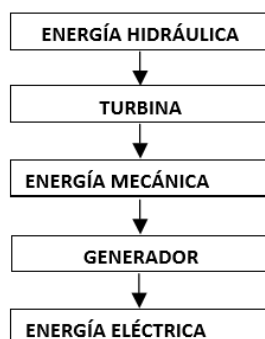
### 3 La energía hidráulica.

La energía hidráulica [5] es una fuente de energía renovable que convierte la energía potencial y cinética de una masa de agua, en energía mecánica a través de una turbina para posteriormente generar electricidad mediante un generador eléctrico.

Una central hidroeléctrica de bombeo, o reversible, es un tipo especial de central hidroeléctrica que posee dos embalses. El agua contenida en el embalse inferior, puede ser elevada, durante las horas valle, mediante bombas al embalse superior, con el fin de reutilizarla posteriormente para la producción de energía eléctrica.

Este tipo de centrales produce energía eléctrica durante las horas puntas del consumo, las de mayor demanda de electricidad, mediante la acción que ejerce un salto de agua sobre los álabes de una turbina asociada a un alternador, es decir, funcionando como una central hidroeléctrica convencional. Después, durante las horas valle, las de menor demanda, se bombea el agua que ha quedado almacenada en el embalse inferior al embalse superior, mediante una bomba o mediante la turbina, si ésta es reversible, de manera que el agua pueda volver a ser utilizada en un nuevo ciclo.

Para poder aprovechar esta energía es necesario el uso de una turbina hidráulica que es un aparato motor capaz de aprovechar la energía potencial y cinética de un fluido y transformarla en energía de rotación por medio de un sistema de cuchillas o palas giratorias. Esta energía de rotación moviliza un generador eléctrico para convertir esta energía mecánica rotativa en energía eléctrica. En la Figura 3.1 se muestra el esquema de la transformación de la energía hidráulica en energía eléctrica.



**Figura 3.1.** Transformación de la energía hidráulica en una central hidroeléctrica.

El objetivo de las centrales hidráulicas e hidroeléctricas es transformar la energía de las caídas y corrientes de agua para transformarla en energía eléctrica, por esta razón, se considera una fuente de energía renovable y poseen unos rendimientos que pueden llegar hasta el 90%.



### 3.1 Partes de las centrales hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas [9] están formadas por una serie de elementos que les permite funcionar correctamente. Algunos de estos equipos son; conducciones de agua mediante tuberías, regulación de la apertura de las válvulas...

A continuación, se va a realizar un desglose con el equipamiento de obra civil y electromecánico que puede llevar una central hidroeléctrica.

#### 3.1.1 Elementos de retención y almacenaje de agua.

Está formado por las siguientes partes:

- Presa y embalse. El embalse es la masa de agua que se encuentra atrapada entre la cadena montañosa y la presa. En cambio, la presa, es la barrera, que junto con el resto de las laderas de la montaña encierran la masa de agua.
- Azud. Es la estructura que se utiliza para conseguir una zona de aguas tranquilas. En la Figura 3.2 se puede observar el azud provocado por la elevación del cauce sobre el río.

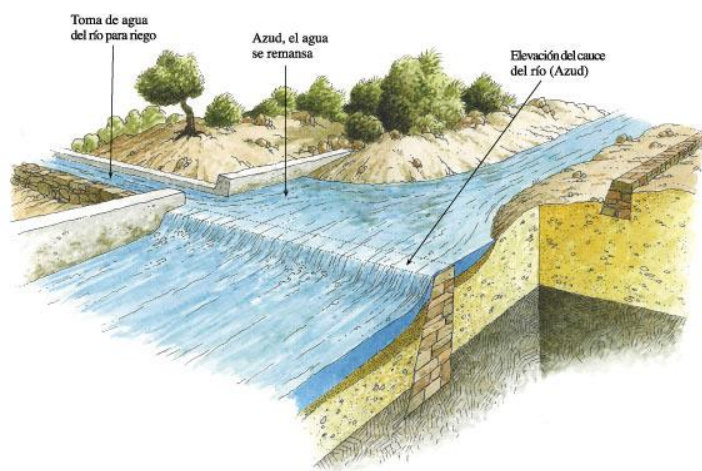


Figura 3.2. Esquema de un Azud.

#### 3.1.2 Elementos de evacuación de caudales.

Está formado por los elementos que permiten regular el caudal que circula por las tuberías del interior de la presa. Destacan las dos siguientes divisiones:

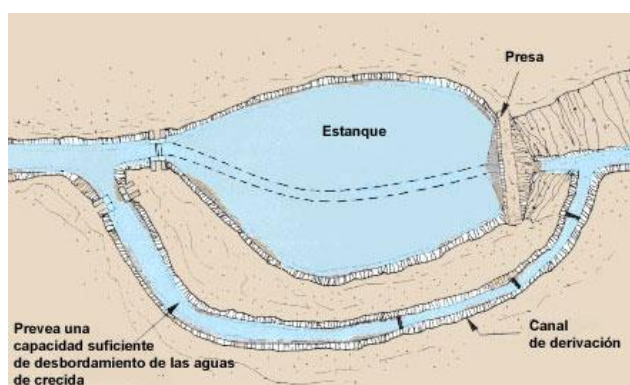
- Aliviadero. Véase el apartado 1.4.
- Desagües de fondo. Comentado en el apartado 1.4.



### 3.1.3 Elementos de conducción del agua.

En este grupo se encuentran todos los elementos necesarios que permiten transportar el agua desde la toma de agua hasta el cauce del río.

- Toma. Es la estructura hidráulica que permite extraer el agua de la presa para sus diferentes usos a través de la apertura de válvulas.
- Canal de derivación. Es la estructura que permite circular el agua hasta el cauce del río, su uso tiene dos principales objetivos; el primero consiste en reconducir el agua del río para la construcción de la presa y el segundo es permitir su utilización para la prevención de desbordamientos en la presa. La Figura 3.3 muestra el esquema de un canal de derivación.



**Figura 3.3.** Esquema de un canal de derivación.

- Cámara de carga. Es el lugar donde comienza la tubería forzada hacia la turbina. Para evitar que se formen vórtices en la cámara de carga, hay que dimensionar el diámetro de la tubería utilizando la teoría de Gulliver, Rindels y Lindblom que dicen que los vórtices se eliminan siempre y cuando la sumergencia de la tubería sea mayor de 0.7 veces su diámetro y la velocidad del agua cumpla la expresión (3.1).

$$v < 0.5 * \sqrt{g * D} \quad (3.1)$$

Donde:

v: Velocidad del agua (m/s).

D: diámetro de la tubería (m).

g: constante de gravedad de 9,81 (m/s<sup>2</sup>).

- Tubería forzada. Es el conducto que recoge el agua de la cámara de carga y la transporta a presión hasta la turbina.
- Cámara de turbina. Es el lugar donde se aloja la turbina, su eje puede ser vertical u horizontal.

- Chimenea de equilibrio. Es una tubería muy grande, alta y costosa que es capaz de soportar el golpe de ariete. Siempre que sea posible se evita su construcción. En el fondo de la Figura 3.4 se observa una chimenea de equilibrio.



**Figura 3.4.** Chimenea de equilibrio de la presa de Bolarque (España).

- Tubo de aspiración. Es la tubería que comienza a la salida de la turbina guiándola hasta el canal de desagüe.
- Canal de restitución. Es la tubería o canal que devuelve el agua al río una vez turbinada.

### 3.1.4 Edificio de la central.

Es el edificio donde se encuentran el equipamiento electromecánico de la central; turbina, generador, sistemas de regulación, control y panel de mandos central. Estos edificios pueden encontrarse en el exterior o ser subterráneos.

Por otro lado, el equipamiento electromecánico es el encargado de que las transformaciones de energía y control de los dispositivos se realice de manera correcta.

### 3.1.5 Rejas y limpiarrejas.

- Rejas. Permiten que el agua que circula por las tuberías contenga la menor cantidad de partículas sólidas, para ello se colocan unas rejas a la entrada de las conducciones.
- Limpiarrejas. Es un rastrillo que se utiliza para evitar que se obstruyan las rejas por las partículas sólidas recogidas.

En la Figura 3.5 se puede observar el conjunto reja y limpiarrejas.



**Figura 3.5.** Sistema de rejas y limpiarrejas.

### 3.1.6 Elementos de apertura y cierre del paso de agua.

- Compuertas. Véase el apartado 1.4.
- Válvulas. Son los elementos de acción que permiten la apertura, cierre y regulación del caudal que fluye por las tuberías. Las válvulas suelen encontrarse totalmente cerradas o totalmente abiertas, aunque en algunas ocasiones se utilizan como regulador en aperturas intermedias con el inconveniente de que se producen grandes pérdidas debido a las turbulencias.
- Ataguías. Su funcionamiento es igual que el de las compuertas con la diferencia que solo se pueden abrir y cerrar cuando el agua no se encuentre en movimiento.

### 3.1.7 Equipamiento eléctrico.

- Generador. Es el encargado de transformar la energía mecánica obtenida por la turbina en energía eléctrica.
- Transformadores de potencia. Es el conjunto de máquinas eléctricas que se encargan de recibir una tensión y corriente determinadas por el primario y extraer la tensión y corriente deseada en el secundario.
- Interruptores automáticos. Estos elementos se encargan del cierre y la apertura del circuito con carga.
- Seccionadores. Son los dispositivos encargados de interrumpir la continuidad del circuito.
- Red de tierras. El objetivo de las instalaciones de puesta a tierra, es evitar que se generen diferencias de potencial peligrosas.
- Pararrayos autoválvulas. Se encargan de proteger la instalación ante tormentas eléctricas.
- Transformadores de medida y protección. Su función es separar los circuitos de potencia.
- Protecciones eléctricas y mecánicas. Su objetivo es evitar que las perturbaciones de la red produzcan un daño sobre los elementos que protege.

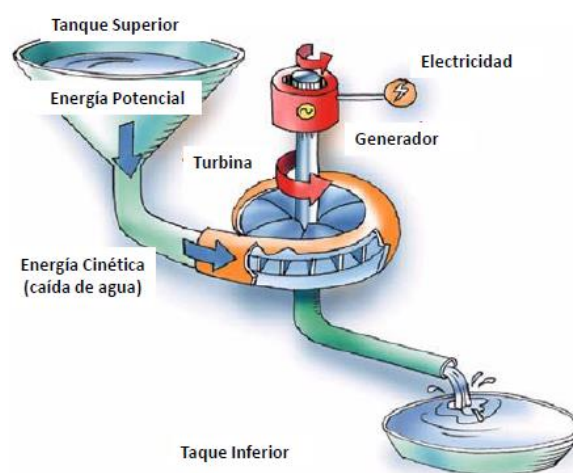
### 3.1.8 Equipamiento hidráulico.

- Turbina. Son las encargadas de la transformación de la energía cinética y potencial del agua en energía mecánica de rotación que posteriormente moverá un generador eléctrico.

- Multiplicador. En las turbinas de poca potencia se utiliza un multiplicador de velocidad que se coloca entre la turbina y el generador para que la velocidad de giro del generador sea el adecuado.

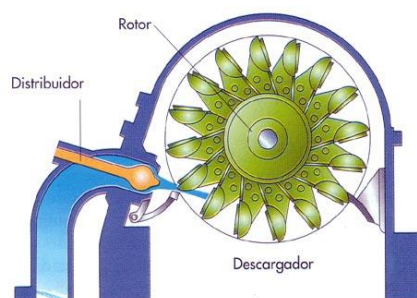
### 3.2 Funcionamiento y elementos de las turbinas.

Las turbinas hidráulicas [6] se colocan en el lugar por donde va a fluir el agua, estas turbinas tienen unas aspas o paletas pegadas al rotor, las cuales girarán debido a la energía del agua. Esta energía de rotación será captada por un generador para convertir esa energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Las partes más relevantes se muestran en la Figura 3.6:



**Figura 3.6.** Partes más representativas que componen una turbina.

- Distribuidor. Es un elemento fijo donde no se produce trabajo mecánico que sirve para que el caudal de agua se acelere al transformar la energía potencial del agua en cinética. La Figura 3.7 muestra una turbina Pelton.



**Figura 3.7.** Distribuidor de una turbina Pelton.

- Rodete. También conocido como rotor es el disco al cual van adheridas un sistema de paletas, álabes o cucharas que gira como consecuencia del impacto del agua sobre dichas paletas. Estos rodetes pueden ser de muchos tipos y formas.
- Tubo de aspiración. Consiste en un conducto, normalmente acodado, que une a las turbinas de reacción con el canal de desagüe y tiene como misión crear una succión a la salida del rotor (depresión).

Tiene dos funciones principales; recuperar la altura de aspiración de la turbina y recuperar la energía cinética a la salida del rodete.

- Carcasa. Se encarga de cubrir y proteger las diferentes partes de la turbina.

Las turbinas hidráulicas se dividen en dos principales grupos:

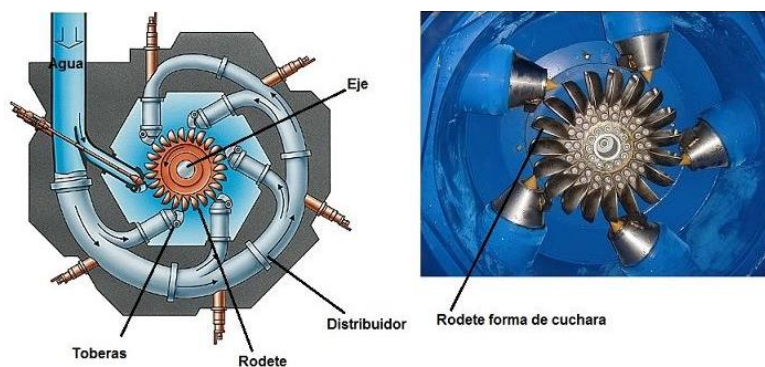
- De acción. El fluido mueve la turbina golpeando las palas del rotor, para ello es necesario que la caída de agua sea muy grande. Las más importantes son las turbinas Pelton y Ossberger.
- De reacción. En este caso el fluido mueve la rueda por la reacción del agua sobre el rotor para lo cual no es necesario una gran caída de agua, pero si un gran caudal. Destacan como principales las turbinas Francis y Kaplan.

### 3.2.1 Turbinas Pelton.

Las turbinas Pelton son uno de los modelos más eficientes de turbina hidráulica. Son turbinas de flujo transversal que se utilizan en saltos grandes (mayores de 200m) con poco caudal (hasta 10m<sup>3</sup>/s), posee un rodete con unos alabes con forma de cuenco. El chorro de agua que es recibido por estos alabes se regula mediante inyectoros. Para que las fuerzas de la rueda estén equilibradas, el número de paletas tiene que ser par.

El diseño de estas turbinas se realiza a medida para cada instalación hidroeléctrica, teniendo en cuenta, el par admisible, el volumen y el caudal nominal. Además, la potencia que se genera, se regula a través de los inyectoros que se encargan de regular el caudal de agua que expulsan.

Como ventajas, destacan su bajo coste de mantenimiento, su gran rendimiento con caudales hasta el 80% inferior al nominal y la posibilidad de instalar su eje de forma vertical y horizontal. En la Figura 3.8 se muestra un esquema de una turbina Pelton y un modelo en pequeña escala de la turbina Pelton.

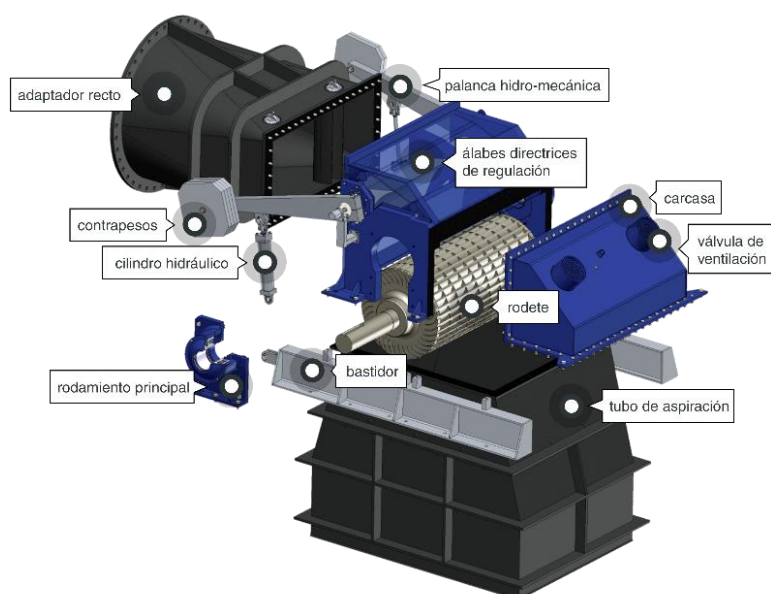


**Figura 3.8.** Turbina hidráulica Pelton.

### 3.2.2 Turbinas Ossberger.

Es una turbina de flujo cruzado con libre desviación y admisión parcial cuyo accionamiento se hace a través de un inyector con sección rectangular que posee un álabe que le permite orientar el caudal que se dirige a la turbina, pero no su caudal. Posee unos rendimientos medios para potencias pequeñas (80%) y altos para medianas y grandes (hasta un 86%) aunque se considera una turbina de régimen lento debido a su bajo número de revoluciones y está diseñada para trabajar con saltos medios.

Su principal punto fuerte es que es una turbina diseñada para trabajar durante largos periodos de tiempo y su mantenimiento es escaso. La Figura 3.9 representa las partes que componen la turbina Ossberger.



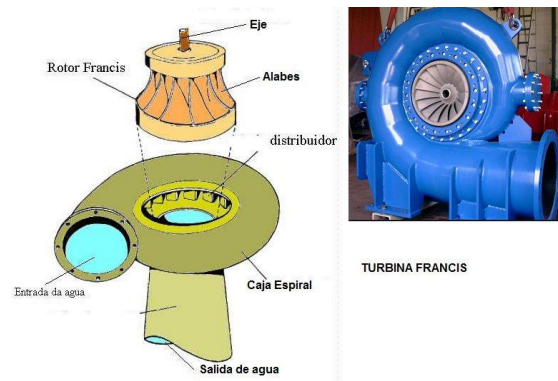
**Figura 3.9.** Turbina hidráulica Ossberger.

### 3.2.3 Turbinas Francis.

Son turbinas de reacción que combinan el flujo radial y axial. Las turbinas Francis son las turbinas hidráulicas más polivalentes, puesto que, aunque estén diseñadas para trabajar con saltos medios (hasta 200m) y caudales medios (2-200m<sup>3</sup>/s), tienen un amplio rango de funcionamiento. Además, combinado con un gran rendimiento, ha hecho que sea la turbina más utilizada a nivel mundial.

Respecto a su funcionamiento, estas turbinas son capaces de cambiar el ángulo de sus alabes para regular el caudal de agua que recibe el rodete. En la Figura 3.10 se puede observar una turbina Francis y las partes que las componen.

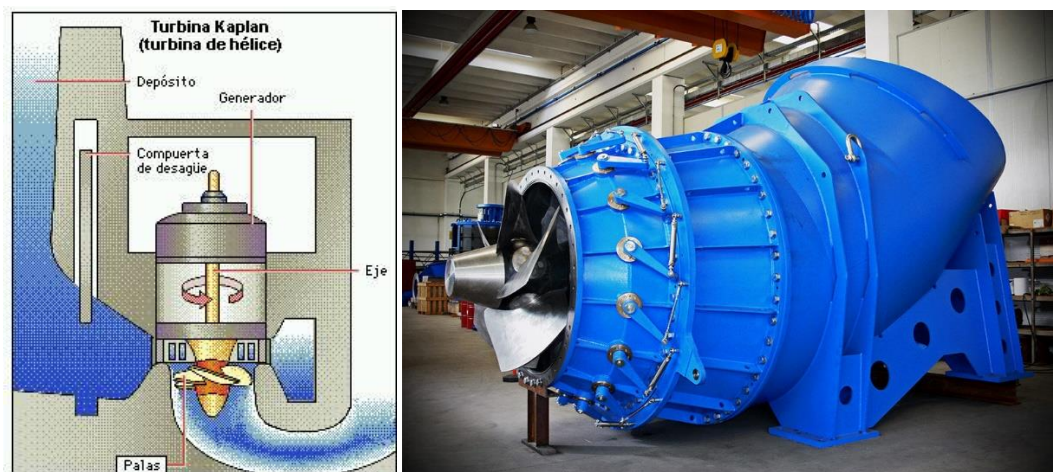




**Figura 3.10.** Turbina hidráulica Francis.

### 3.2.4 Turbinas Kaplan.

Son turbinas de tipo axial con un rodillo cuyo funcionamiento es similar al de la hélice de un barco, que al igual que las turbinas Francis, son capaces de modificar el ángulo de sus palas mientras funcionan. Emplean el mismo sistema que las turbinas Francis, puesto que, para mover su rotor, utilizan la presión del agua, de forma que a la entrada sea mayor que a la salida. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua pequeños (hasta 50m) y caudales grandes (mayores de 15m<sup>3</sup>/s). Su principal desventaja es que su coste suele ser mayor y su mantenimiento es algo más caro que las anteriores turbinas citadas. En la Figura 3.11 se puede observar un esquema del funcionamiento de las turbinas Kaplan y una turbina a escala real.



**Figura 3.11.** Turbina hidráulica Kaplan.

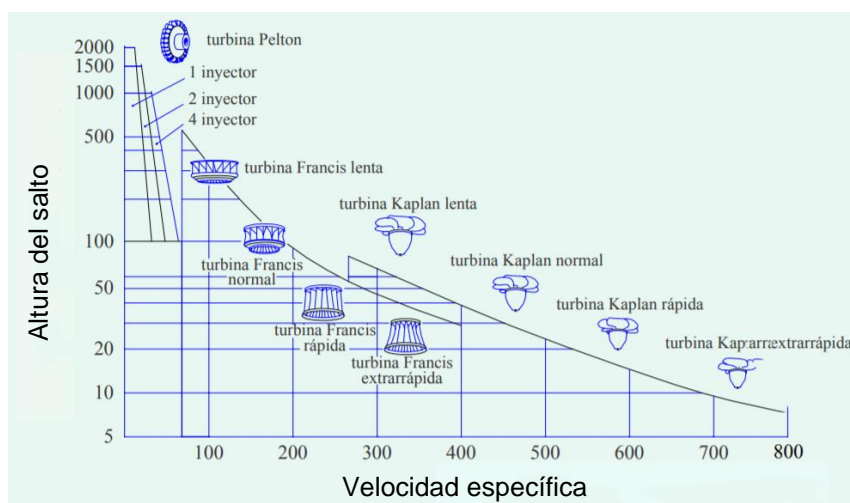
## 3.3 Selección de la turbina.

La selección del tipo de turbina depende de tres aspectos:

- La altura.

- El caudal.
- La velocidad específica.

Para conocer cuál es la turbina más apropiada para un determinado aprovechamiento hidráulico se recomienda utilizar como guía la Figura 3.12.



**Figura 3.12.** Elección de la turbina según la altura del salto y la velocidad específica.

Conocida la altura del salto que se tiene y la potencia de la turbina, se utiliza la expresión (3.2) para calcular la velocidad específica de la turbina.

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{P_{\text{turb}}}}{H_n^{1.25}} \quad (3.2)$$

Donde:

$n_s$ : Velocidad específica (r.p.m.).

$n$ : Velocidad de la turbina (r.p.m.).

$P_{\text{turb}}$ : potencia mecánica nominal de la turbina (kW).

$H_n$ : Altura neta (m).

Como la turbina va a ir acoplada a un generador para suministrar electricidad a una frecuencia de 50hz, la velocidad de giro tiene que cumplir la expresión (3.3).

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} \quad (3.3)$$

Donde:

$n$ : Velocidad de la turbina (r.p.m.).

$f$ : Frecuencia (Hz).

$P$ : Número de pares de polos del alternador. Para conocer la velocidad de giro en función del número de pares de polos se utiliza la tabla que aparece a continuación.



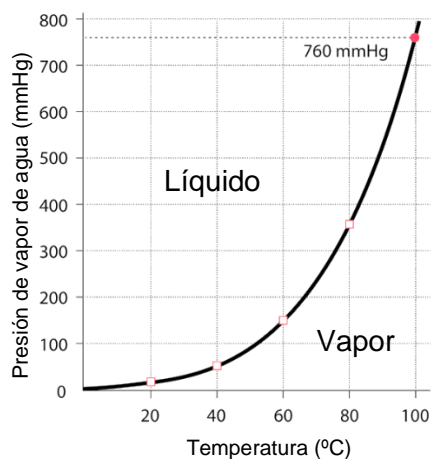
P (pares de polos)	N(rpm)
1	3000
3	1000
5	600
6	500
8	375
10	300

### 3.4 Cavitación.

La cavitación es un fenómeno que ocurre cuando un líquido discurre a través de un conducto donde la presión es menor que su presión de vapor, el líquido hierve, pasa a estado gaseoso y se forman burbujas de vapor. Estas burbujas cuando llegan a otra zona donde la presión vuelve a ser mayor que la presión de vapor vuelven al estado líquido explotando bruscamente.

Este fenómeno es muy perjudicial y se produce en el interior de las turbinas hidráulicas debido a que, en algún punto o línea de corriente de un líquido, la presión desciende por debajo de la presión de vapor. Este fenómeno reduce la velocidad máxima a la cual las máquinas hidráulicas pueden funcionar, lo que conlleva una disminución de su rendimiento debido principalmente a la aparición de burbujas de vapor de agua, que no permiten circular al agua en estado líquido de manera óptima.

Además, produce ruidos y vibraciones junto con una erosión muy agresiva en la superficie de las palas. La Figura 3.13 muestra las zonas en las que el estado del agua es líquido o gaseoso en función de la presión y de la temperatura.

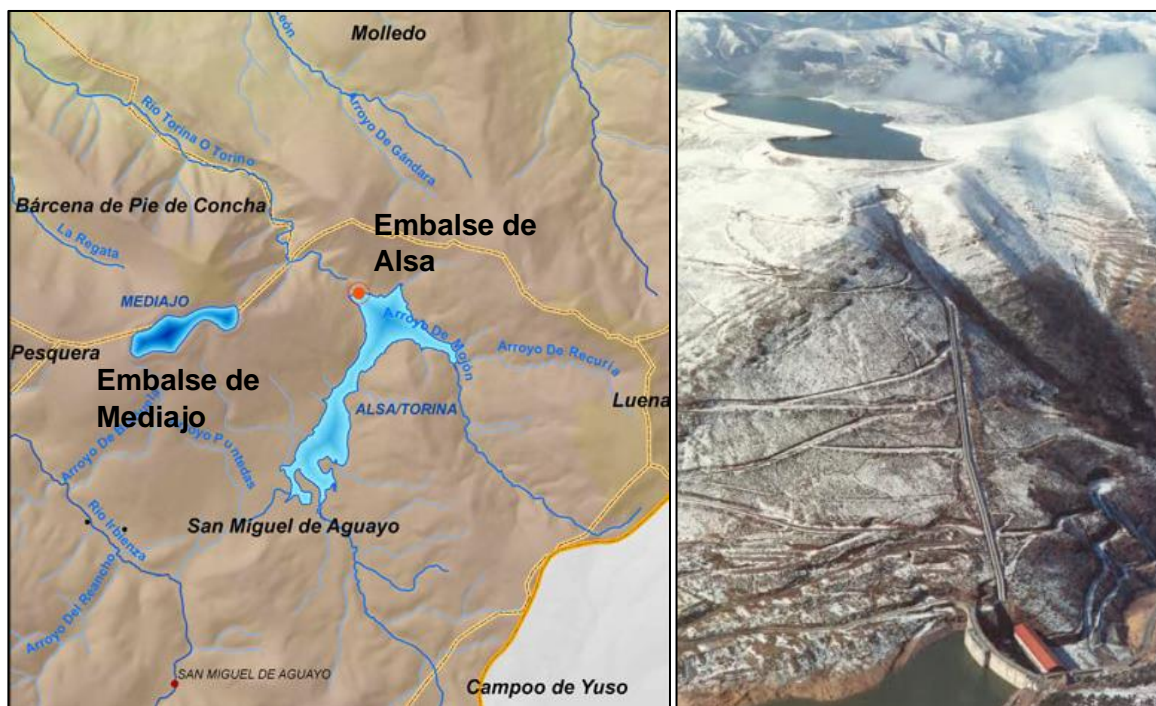


**Figura 3.13.** Relación entre la presión de vapor de agua y la temperatura.

# Capítulo 4: **CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE AGUAYO**

## 4 Descripción general de la central de Aguayo.

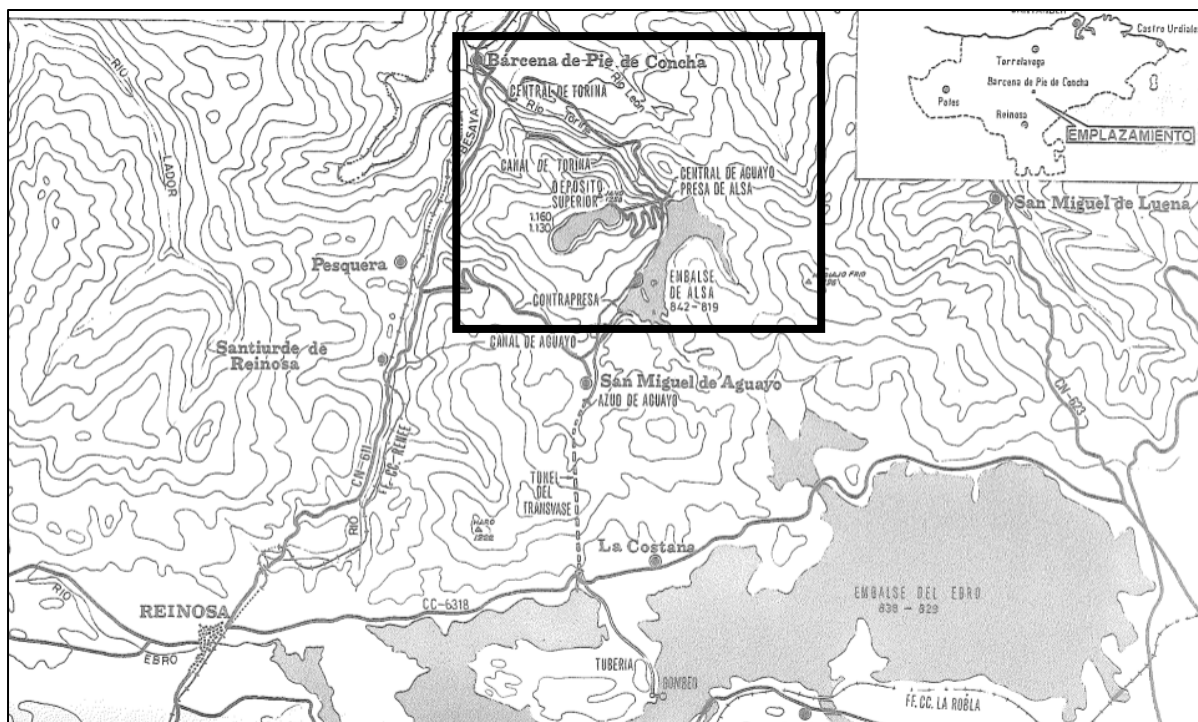
La central hidráulica de Aguayo es una central reversible de bombeo puro que turbiniza el agua del embalse de Mediajo para almacenarlo aguas abajo en el embalse de Alsa, donde de nuevo se bombeará agua para mandarla al embalse de Mediajo. La Figura 4.1 muestra la situación geográfica del embalse de Alsa.



**Figura 4.1.** Situación de los embalses que forman parte de la central de Aguayo.

El salto de Aguayo está ubicado en el ayuntamiento de Bárcena de Pie de Concha, en la provincia de Cantabria. Es un aprovechamiento hidroeléctrico de bombeo puro que utiliza como depósito inferior el embalse de Alsa, creado por las presas de Alsa y Matahoz y como depósito superior el embalse de Mediajo, creado por la presa del mismo nombre. En la actualidad aporta un 38% de la capacidad de generación eléctrica instalada en Cantabria.

La central hidroeléctrica de Aguayo [10] se sitúa al pie de la presa de Alsa que se enlaza con el vaso superior mediante dos tuberías forzadas de diámetro variable entre 3.80m y 3.40m y 1300 metros de longitud y con el vaso inferior por medio de cuatro tuberías, una por cada grupo, de 3.50m de diámetro y 70 metros de longitud tratándose de un aprovechamiento en circuito cerrado, es decir, la masa de agua que sube a Mediajo baja a Alsa y viceversa, ya que su único uso es para la generación de electricidad, excepto en una serie de condiciones que se comentarán más adelante. En la Figura 4.2 se puede observar la situación geográfica del embalse de Alsa sobre la comunidad autónoma de Cantabria.



**Figura 4.2.** Plano de situación del embalse de Alsa (Fuente: Electra de Viesgo).

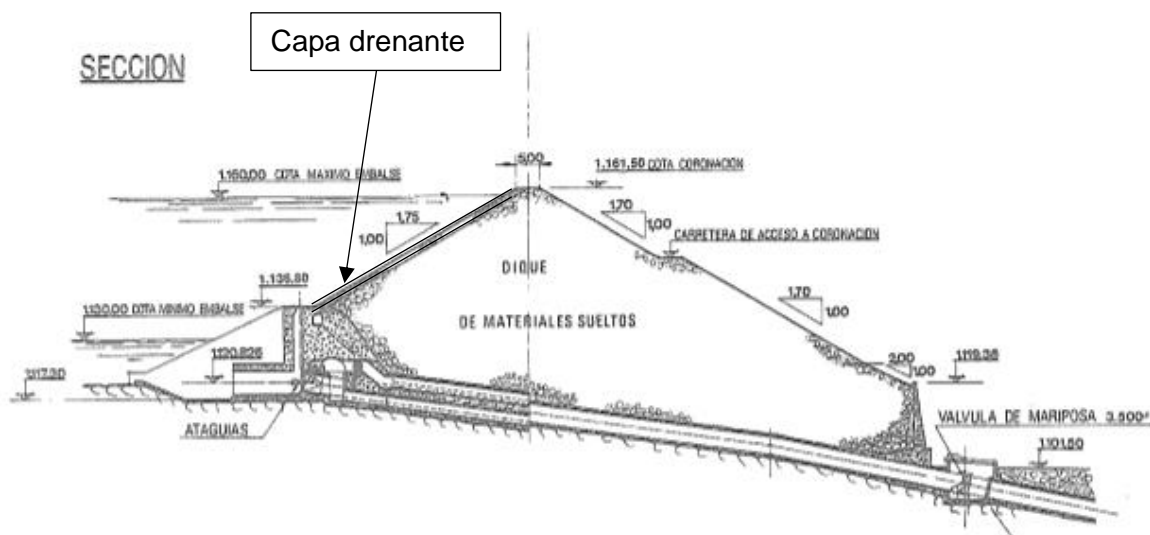
El embalse superior (Mediajo) se encuentra muy próximo al Pico Jano (1290 metros), cuenta con una capacidad útil de 10hm<sup>3</sup>, con una carrera del embalse de 30 metros (1160-1130 metros). Las dos válvulas de apertura se encuentran a 1120.826 metros, pero el volumen de agua de 1130 a 1120.826 metros no es aprovechable. La Figura 4.3 muestra en vista satélite el depósito superior de Mediajo.



**Figura 4.3.** Vista satélite del embalse de Mediajo.

La superficie de lámina máxima (momento en que el embalse está al 100%) es de 44 hectáreas, que se produce en la cota 1160 (cota máxima del embalse) siendo la cota de coronación 1161.5 metros. La diferencia de 1.5 metros entre la cota máxima del embalse y la cota de coronación es para garantizar el no desbordamiento del embalse en situaciones extremas.

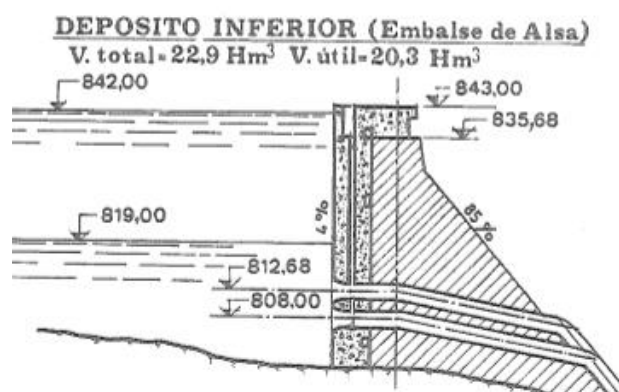
El dique de este depósito está formado por 4.3 hectómetros cúbicos de materiales sueltos y una escollera drenante en la parte interior. La Figura 4.4 muestra un esquema de la sección de la presa de Mediajo.



**Figura 4.4.** Presa superior (Fuente: Electra de Viesgo).

Respecto al depósito inferior (Alsa), tiene una capacidad útil de 20.3 hectómetros cúbicos y una capacidad total de 22.9 hectómetros cúbicos. La carrera del embalse es de 23 metros, de la cota 819 a 842 metros. Dos conductos se encuentran en la cota 812.68 y los otros dos en la cota 808, ya que hay una tubería de baja presión de 3.50 metros de diámetro para cada grupo generador. Con el depósito lleno, la superficie de lámina máxima es de 170 hectáreas.

La Figura 4.5 muestra la sección de la presa de Alsa.



**Figura 4.5.** Depósito inferior (Fuente: Electra de Viesgo).

El embalse de Alsa tiene dos presas; una que da a Bárcena de pie de concha, conocida como presa de Alsa y otra en la parte trasera, que se construyó para que el agua no desbordara sobre el pueblo de Aguayo, llamada presa de Matahoz. En la Figura 4.6 se puede observar un plano aéreo del embalse de Alsa y sus dos presas.





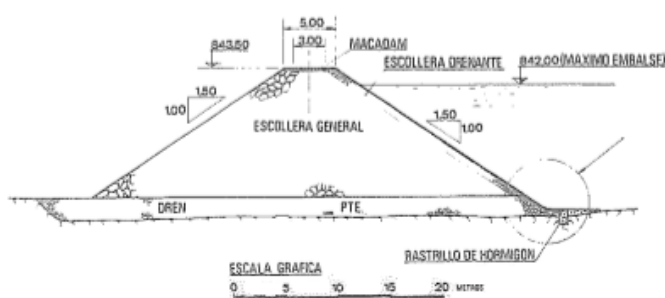
**Figura 4.6.** Situación de la presa de Alsa y Matahóz.

La presa de Alsa tiene una altura máxima de 49.32 metros, parte en la cota 793.68 y su cota de coronación es de 843 metros, un metro por encima de la cota máxima del embalse (842 metros). Su longitud es de 202 metros y es una presa de fábrica de gravedad proyectada en 1920 por Presmares y Elorza Fontana, formada por 88.600 metros cúbicos de hormigón. La Figura 4.7 muestra dos imágenes de la presa de Alsa.



**Figura 4.7.** Presa de Alsa.

La contrapresa de Matahóz, posee una altura máxima de 14 metros y una longitud de coronación de 204 metros. Es una presa de materiales sueltos formada por una escollera general, una escollera drenante, un rastrillo de hormigón y macadam que ocupa un volumen total de 22800 m<sup>3</sup>. En la Figura 4.8 se puede observar un esquema de la sección de la contrapresa de Matahóz y una imagen de la contrapresa en la realidad.



**Figura 4.8.** Contrapresa de Matahöz (Fuente: Electra de Viesgo).

La central contiene cuatro alternadores-motores de 106MVA cada uno, lo que implica que la potencia instalada es de 424MVA. Conociendo el  $\cos \varphi$  de estos grupos, se puede calcular la potencia en MW utilizando la expresión (4.1).

$$P(\text{MW}) = P(\text{MVA}) * \cos \varphi = 424 * 0.8 = 339.2 \text{ MW} \quad (4.1)$$

Aunque en bombeo la potencia máxima es de 339.2MW, en generación es prácticamente igual, pero con una pequeña disminución de potencia, 339MW. La Figura 4.9 muestra las cuatro bombas que se encuentran en el interior de la central hidroeléctrica de Aguayo.



**Figura 4.9.** Los cuatro generadores de la central hidroeléctrica de Aguayo.

La tensión de generación es de 12kV y la velocidad de giro nominal son 500rpm. Respecto a las cuatro turbinas-bomba, la central está formada por cuatro turbinas Francis reversibles capaces de mover unos caudales en generación de 29 a 33 m<sup>3</sup>/s y de 21 a 28m<sup>3</sup>/s en bombeo, aunque para simplificar y facilitar los cálculos, se ha decidido que en generación el caudal máximo que se podrá mover serán 31m<sup>3</sup>/s y en bombeo 24.5m<sup>3</sup>/s, valores que se corresponden al punto medio de cada uno de los rangos anteriores, respectivamente. Por último, el salto bruto máximo es de 341 metros y el salto bruto mínimo 288 metros.

- El salto bruto máximo se produce cuando el embalse superior se encuentre lleno (1160 metros) y el embalse inferior en su nivel mínimo (819 metros).

$$\text{Salto bruto máximo} = 1160 - 819 = 341 \text{ metros}$$

- El salto bruto mínimo ocurre cuando el embalse superior se encuentre al nivel mínimo (1130 metros) y el embalse inferior en su nivel máximo (842 metros).

$$\text{Salto bruto máximo} = 1130 - 842 = 288 \text{ metros}$$

- El salto bruto medio es de 328.5 metros.

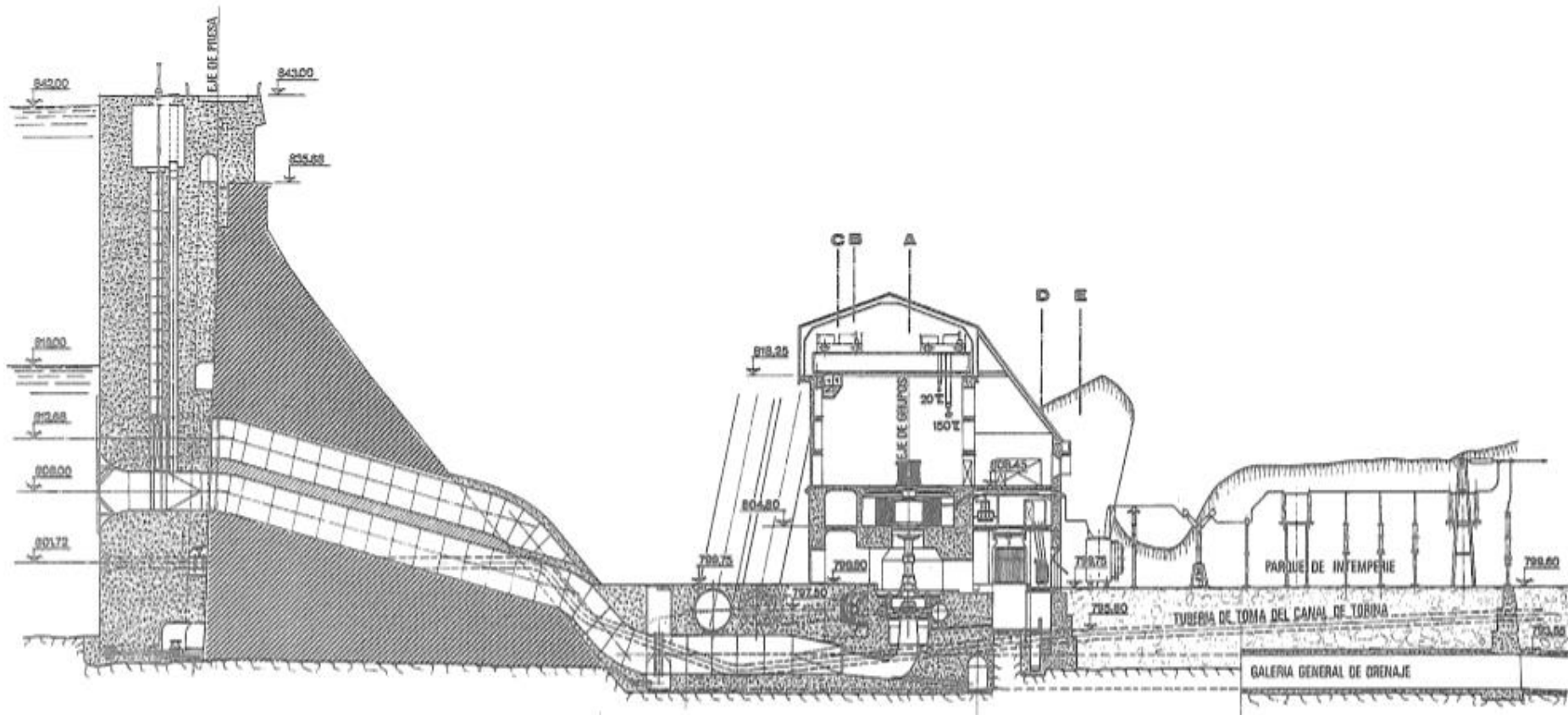
El arranque se realiza en sentido bomba mediante un motor de lanzamiento “Pony” de 12kV y 8000CV. En la Figura 4.10 se puede observar el conexionado de tuberías entre la central y ambos depósitos.



**Figura 4.10.** Central de Aguayo con el conexionado de tuberías entre el embalse inferior-central-embalse superior.

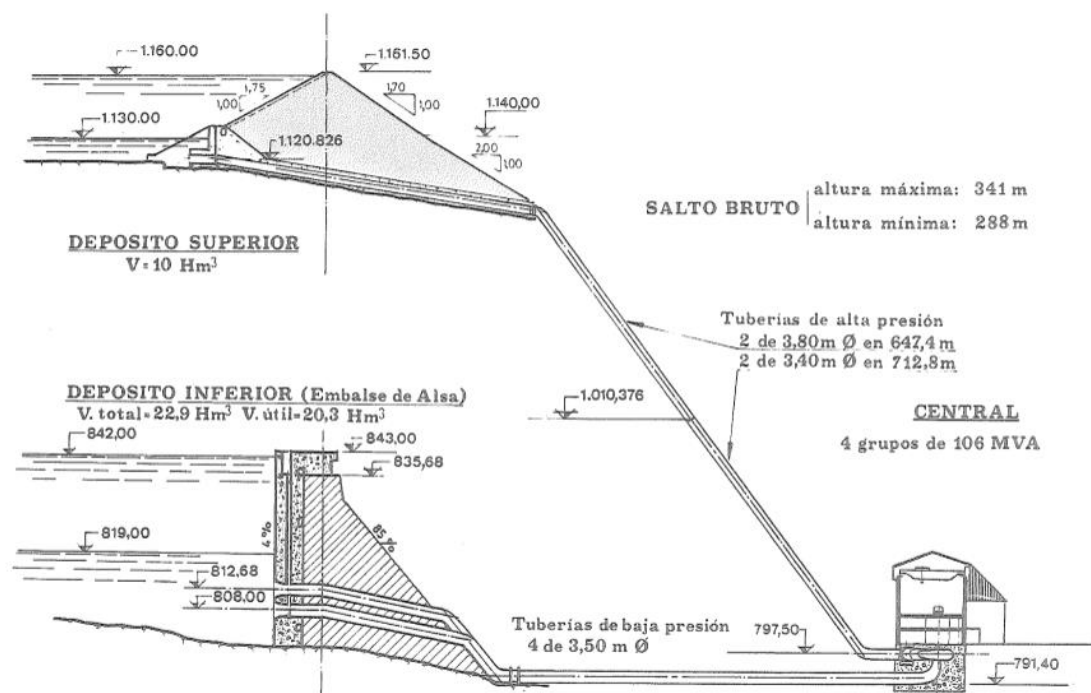


La Figura 4.11 muestra el plano de conexión del depósito inferior con la central.



**Figura 4.11.** Presa y central de Alsa (Fuente: Electra de Viesgo).

Para comprender más fácilmente el esquema general de la estación, se muestra la Figura 4.12 que se corresponde con un esquema del salto.



**Figura 4.12.** Esquema del salto (Fuente: Electra de Viesgo).

## 4.1 Acontecimientos históricos.

Cabe destacar que las obras del embalse de Alsa se iniciaron en 1921, hace casi un siglo. Posteriormente, en 1978 se produjo el recrecimiento de la presa de Alsa y su refuerzo debido al desgaste creado durante esos 60 años junto con la posterior perforación de la presa para introducir las cuatro tuberías que conectan el depósito inferior con la central. Como consecuencia del recrecimiento de la presa de Alsa, fue necesario construir una contrapresa en la parte trasera del embalse para que el agua no desbordara por la cola. Al mismo tiempo se construyó la presa de Mediajo y por último se instalaron los cuatro grupos generadores y las dos tuberías que conectan el embalse superior con la central y el embalse inferior con la central. Estas obras finalizaron en 1984. En la Figura 4.13 se muestran las dos tuberías que conectan el depósito superior con la central.

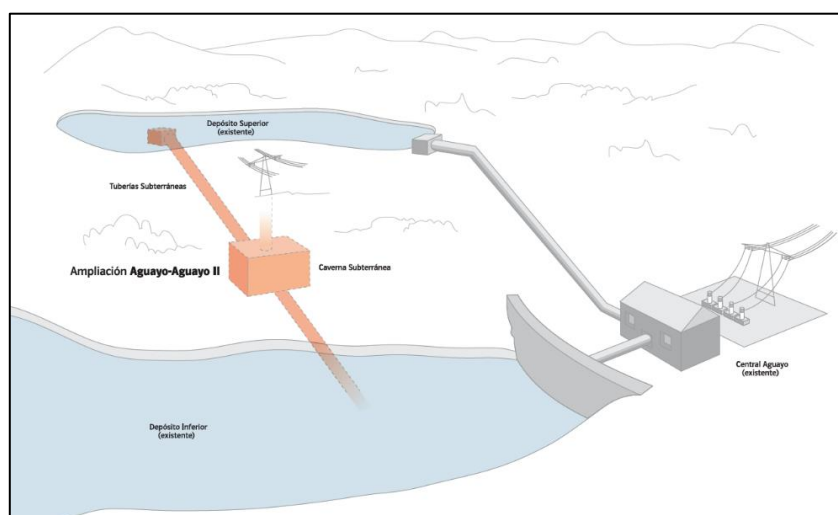


**Figura 4.13.** Tuberías de alta presión que unen la central con el depósito de Mediajo a 1290 metros.

## 4.2 Ampliación de la central hidroeléctrica de Aguayo.

En el año 2012 se proyectó la primera ampliación de la central hidroeléctrica de Aguayo (Figura 4.14) [8]. Esta ampliación permitiría optimizar el funcionamiento de la instalación sin realizar cambios en los embalses. Se construirían unas nuevas conducciones de agua, una nueva caverna subterránea y nuevos equipos de generación que permitirían a la central generar una potencia máxima de 1000MW, lo que provocaría una producción anual media de 2000GWh/año.

El inicio de la obra comenzaría en 2014 y finalizaría en 2017 con una inversión necesaria de 600 millones de euros por parte de E.ON España empresa dueña de la central en aquellos años.



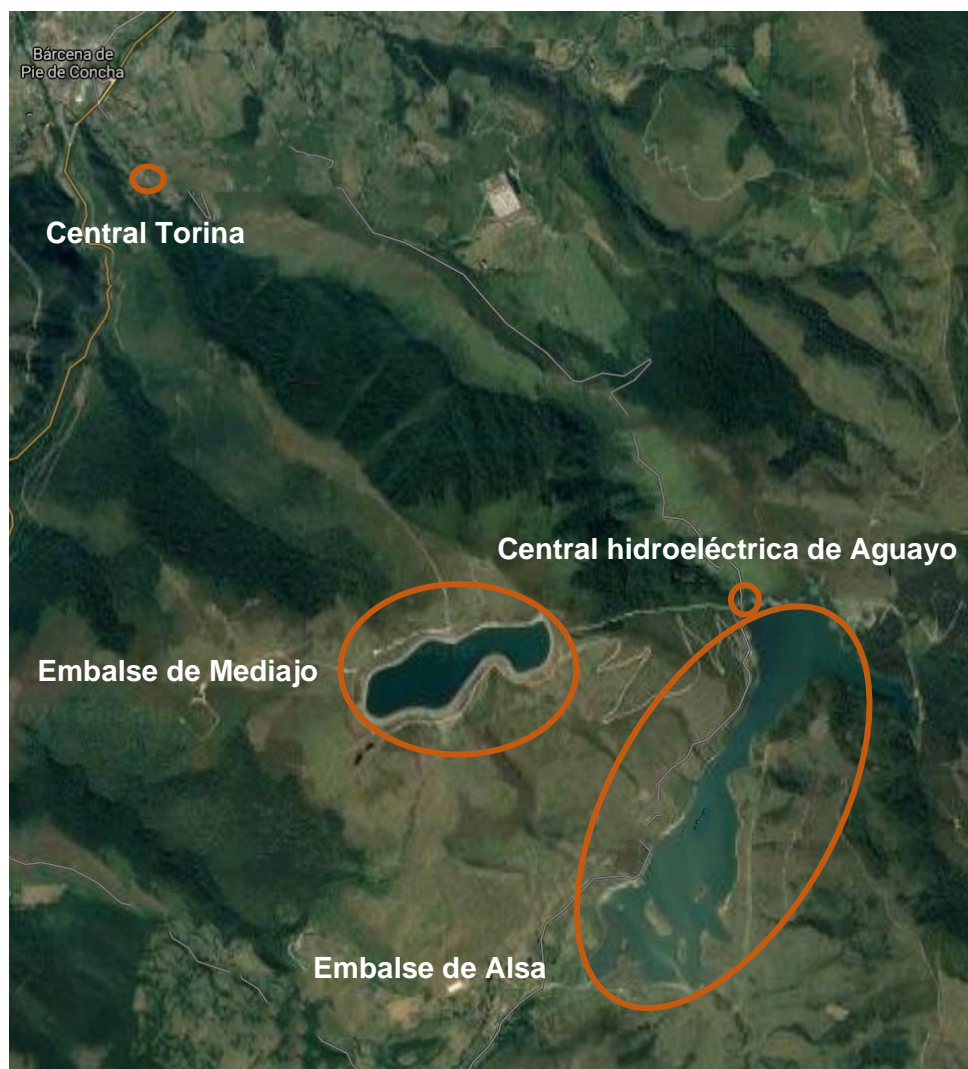
**Figura 4.14.** Ampliación de la central de Aguayo.

Desgraciadamente aquella ampliación no se llevó a cabo, aunque la nueva propietaria, Repsol, presentará a finales de este año el proyecto de viabilidad de dicha ampliación, que impulsará a Cantabria hasta ser una región excedentaria en potencia, de la mano de las energías renovables y concretamente de la energía hidráulica de bombeo.

## 4.3 Central Torina.

La central eléctrica de Torina, se encuentra a 7 kilómetros aguas debajo de la central hidroeléctrica de Aguayo. La Figura 4.15 muestra la vista satélite de la central de Torina. Esta central no se ha incluido en el modelo debido a las siguientes razones:

- El control de ambas centrales pertenece a órganos diferentes.
- La potencia y relevancia de esta central es mínima.
- La información sobre ella es inexistente debido a su escaso uso.



**Figura 4.15.** Vista satélite del embalse de Alsa, embalse de Mediajo y las centrales de Aguayo y Torina.

Esta central se encarga de recibir los excedentes de agua del embalse de Alsa que a través de una toma de 456m de desnivel y 5km de longitud llega a las turbinas desde la presa de Cuchío.



**Figura 4.16.** La central eléctrica de Torina con las turbinas en verde y los alternadores en azul.



Este edificio de dos plantas alberga tres turbinas en su planta baja. En la Figura 4.16 se pueden observar los tres generadores de la central de Torina a la izquierda y el edificio que los alberga a la derecha.

Cada uno de estos generadores es de 5 MW, pero las tuberías no tienen el diámetro necesario para alimentar a los 3 grupos a la vez, por lo que su capacidad máxima no sobrepasa los 13 MW. Por otro lado, es una central que no se utiliza prácticamente nunca, puesto que la potencia que aporta respecto a la central de Aguayo es muy pequeña y la mayoría del tiempo se encuentra desconectada. La Figura 4.17 muestra una parte del panel de control de la central de Torina.



**Figura 4.17. Sala de control.**

# Capítulo 5:

# **OBJETIVOS Y METODOLOGÍA**

## 5 Objetivos y metodología.

En este apartado se va a definir el objetivo principal del trabajo y la metodología empleada en cada apartado.

Debido al incremento del porcentaje de la potencia renovable instalada en los últimos años y la intermitencias de estos recursos (energía solar y eólica principalmente), hace necesaria la existencia de centrales hidroeléctricas reversibles que puedan bombear agua del depósito inferior al superior cuando existan excedentes eléctricos provenientes de energías renovables, es decir, que la potencia suministrada sea mayor que la demandada por la red y al mismo tiempo, en los momentos en los que la demanda supere la capacidad de producción turbinar para poder compensar esta demanda.

De esta forma las centrales hidroeléctricas reversibles se convierten en unas grandes baterías de energía renovable con un gran rendimiento energético.

El objetivo de este proyecto es recrear el sistema de control de la central hidroeléctrica de Aguayo realizando un sistema de control y monitorización del nivel de agua de ambos embalses.

Para su monitorización y control se realizará una interfaz gráfica que permita el control del nivel de agua de los depósitos, la apertura de las válvulas, la carga que reciben las turbinas, la potencia de la red, los caudales que circulan por las tuberías, que informe de la situación meteorológica que rodea a la central, que permita realizar maniobras e interaccionar al usuario de forma directa. Además, contará con dos modos de funcionamiento; uno manual y otro automático.

En el modo automático, el programa tendrá que ser capaz de calcular la carga necesaria que necesitan las turbinas para generar la demanda eléctrica exigida.

En modo manual, el usuario podrá interactuar con el programa para abrir cualquiera de las dos válvulas en cualquier porcentaje independientemente de los excedentes o demanda existente en cada momento.

Todo ello será implementado en Matlab y utilizando la herramienta Matlab GUIDE.

### 5.1 Matlab GUIDE.

Matlab [7] dispone de una app con interfaces gráficas de usuario (Matlab GUIDE) que permite el control de programas que necesiten un ingreso continuo de datos.

Esta herramienta contiene todas las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++.

Una aplicación GUIDE consta de dos archivos; un “.m” y un “.fig”. El archivo “.m” contiene todo el código con las acciones que tiene que realizar cada uno de los botones de control de la interfaz y el archivo “.fig” posee todos los elementos gráficos.

En la Figura 5.1 se muestra la interfaz de control realizada mediante Matlab.



**Figura 5.1.** Interfaz gráfica de control del embalse de Alsa.

## 5.2 Partes de la central hidroeléctrica de Aguayo.

La central hidroeléctrica de Aguayo consta de tres partes principales, que se pueden observar en la Figura 4.11:

- Unidad de generación. Son las tuberías que permite transportar el agua desde los depósitos hacia la turbina donde se transforma la energía potencial del agua en mecánica a través de cuatro turbinas Francis reversibles y posteriormente se transforma esta energía mecánica en eléctrica a través del rotor del generador.
- Unidad de transformación. Son el conjunto de máquinas eléctricas estáticas de las que dispone la central para cambiar los parámetros de la tensión de la energía eléctrica.
- Unidad de salida de línea. Son las líneas de transporte de energía eléctrica.



### 5.3 Potencia.

La potencia instalada de la central hidroeléctrica se puede calcular de dos formas:

- Conociendo todos los rendimientos.

$$P_{INST} = \gamma * Q_E * H_N * \eta_T * \eta_M * \eta_G * \eta_{TR} \quad (5.1)$$

Donde:

$P_{inst}$ : Potencia instalada o potencia útil nominal (kW).

$\gamma$ : Peso específico del agua (9,81 kN/m<sup>3</sup>).

$Q_e$ : Caudal de equipamiento (m<sup>3</sup>/s).

$H_n$ : Salto neto (m).

$\eta_t$ : Rendimiento de la turbina.

$\eta_m$ : Rendimiento del multiplicador.

$\eta_g$ : Rendimiento del generador.

$\eta_{tr}$ : Rendimiento del transformador.

- No conociendo todos los rendimientos. Al no conocerse los rendimientos reales de cada una de las anteriores partes, se puede utilizar la aproximación (5.2).

$$P_{INST} = 8 * Q_E * H_N = 8 * 33 * 314.5 = 83.028 \text{ MW} \quad (5.2)$$

Como se dispone de 4 turbinas, la potencia instalada será (5.3):

$$P_{INST} = 4 * 83.028 = 332.112 \text{ MW} \approx 339.2 \text{ MW} \quad (5.3)$$

Por otro lado, para calcular la potencia instantánea que nos proporcionan las turbinas en cada momento, se utiliza la expresión (5.4):

$$P = \rho * g * Q * H * \eta \quad (5.4)$$

Donde:

$P$ : Potencia (W).

$Q$ : caudal (m<sup>3</sup>/s).

$\rho$ : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>), en el caso del agua es 1000kg/m<sup>3</sup>.

$H$ : Salto entre depósitos.

$g$ : Gravedad (m/s<sup>2</sup>).

$\eta$ : Rendimiento de la turbina.

Utilizando un ejemplo, si en un momento concreto se está turbinando un caudal de 20m<sup>3</sup>/s, con un salto de 300 metros y suponiendo un rendimiento de la turbina para ese caudal del 90%, la potencia que se estará generando será (5.5):

$$P = \rho * g * Q * H * \eta = 1000 * 9.81 * 20 * 300 * 0.9 = 52.974\text{MW} \quad (5.5)$$

Pero al contar con cuatro grupos generadores (5.6):

$$P = 4 * 52.974 = 211.896\text{MW} \quad (5.6)$$

Las dos formas que existen de conseguir una mayor potencia de generación son dos:

- Variando el caudal disponible. Si se observa la anterior ecuación que define la potencia que se genera, se puede comprobar como la variación del caudal afecta de manera proporcional a la potencia generada, es decir, cuanto mayor sea el caudal mayor será la potencia y viceversa. De hecho, el caudal afecta por partida doble ya que el rendimiento de la turbina está directamente relacionado con el caudal utilizado siendo este mayor cuanto más cerca se encuentre el caudal del caudal nominal.
- Variando el salto entre depósitos. La mejor forma de conseguir una mayor potencia es hacer que el salto entre depósitos sea lo mayor posible. Este método afecta mucho más que el del caudal puesto que las variaciones que se generan en este caso son aún mayores.

El objetivo es mantener el depósito inferior lo más bajo posible y el superior con el mayor nivel posible para que el salto bruto sea lo más grande posible. Además, para no limitar la operación de desembalse del depósito de Mediajo sobre el de Alsa, no se debe superar una capacidad del 70% del conjunto, es decir, en el embalse de Alsa tendrá que existir un volumen libre mínimo igual al volumen almacenado en el depósito superior.

Además, para evitar el fenómeno de la cavitación explicado anteriormente, la central de Aguayo se encuentra por debajo del nivel del embalse inferior para crear una contrapresión en el rodete.

## 5.4 Energía producida y horas equivalentes.

Para calcular la energía producida durante un año por la central hidroeléctrica, se utiliza el número de horas equivalentes (he). Para poder conocer los kWh producidos por esta central se ha tenido que hacer uso de los ficheros de datos de 2017 de la potencia generada por cada una de las comunidades autónomas de España. La Figura 5.2 muestra el balance energético de Cantabria.

BALANCE (GWh)			
Balance	Cantabria	España	% del total
Hidráulica	161	18.364	0,9
Turbinación bombeo	400	2.249	17,8
Nuclear	0	55.609	-
Carbón	0	45.196	-
Fuel / gas	0	7.011	-
Ciclo combinado	0	37.296	-
Hidroeléctrica	0	20	-
Eólica	66	47.897	0,1
Solar fotovoltaica	2	8.385	0,0
Solar térmica	0	5.348	-
Otras renovables	83	3.614	2,3
Cogeneración	1.165	28.170	4,1
Residuos no renovable	37	2.608	1,4
Residuos renovables	37	877	4,2
Generación neta	1.951	262.645	0,7
Consumos en bombeo	-667	-3.675	18,1
Saldo Intercambios	3.084	9.171	-
<b>Demanda B.C</b>	<b>4.368</b>	<b>268.140</b>	<b>1,6</b>

**Figura 5.2.** Balance generación Cantabria 2017 (Fuente: Red Eléctrica de España).

El número de horas equivalentes se obtiene a partir de la expresión (5.5):

$$h_e = \frac{E_{ANUAL}}{P_{NOMINAL}} = \frac{400000}{339.2} = 1179.25 \text{ horas} \quad (5.5)$$

Donde:

$h_e$ : Número de horas equivalentes (h).

$E_{anual}$ : Energía generada anualmente (kWh).

$P_{nominal}$ : Potencia nominal de la instalación (kW).

Atendiendo a este parámetro la central de Aguayo se considera una central punta, ya que no supera las 2000 horas equivalentes. Si superara las 5000 sería una central base y si estuviera en el rango comprendido entre 2000 y 5000 sería una central semipunta.

Aunque este parámetro, hay que evaluarlo con cautela, puesto que no todos los años se genera la misma potencia ni se turbinan el mismo número de horas.

Otro parámetro importante es el factor de carga ( $f_c$ ) que relaciona el número de horas equivalente de uso de la instalación frente a las 8760h que tiene un año. Se rige por la expresión (5.7).

$$F_c = \frac{H_E}{8760} = \frac{1179.25}{8760} = 0.1346 \quad (5.7)$$

Bajo este dato, la central tan solo se utiliza durante un 13.46% del año para la generación de electricidad.

## 5.5 Altura del salto de agua.

Como se ha demostrado anteriormente, la potencia instantánea es proporcional a la altura del salto y al caudal. La altura del salto es la distancia vertical que recorre el agua desde el depósito inferior hasta el superior. Existen cuatro tipos de salto:

- Salto neto ( $H_n$ ). Diferencia entre el salto bruto y las pérdidas de carga.

$$H_n = H_h - H_p$$

- Salto bruto ( $H_h$ ). Es la diferencia de cotas entre el nivel de agua de ambos embalses. Se dispone de un salto bruto en un rango de entre 341 metros (altura del salto máxima) y 288 metros (altura del salto mínima).
- Salto útil ( $H_u$ ). Es la diferencia de nivel entre la lámina superior de agua y el punto del río donde se suelta el agua turbinada (793.55 metros).

$$H_u = \text{Altura de la lamina superior de agua} - 793.55$$

- Pérdidas de carga ( $H_p$ ).

### 5.5.1 Pérdidas de carga.

Es muy importante reducirlas lo máximo posible, ya que de lo contrario se producirán pérdidas por rozamiento y la velocidad de movimiento del fluido será menor en el sentido en el que se quiere desplazar el fluido.

Para reducir estas pérdidas solo hay dos opciones; una consiste en aumentar la pendiente por la que circula el fluido para reducir el rozamiento, pero esta no siempre es una opción posible, puesto que depende del terreno.

La segunda opción es hacer que las paredes interiores de los tubos sean lo más lisas posibles, lo que conlleva un aumento significativo del gasto, por lo que hay que procurar encontrar un equilibrio entre este gasto y estas pérdidas, intentando que las pérdidas por rozamiento no superen el 4% del salto total.

La solución más barata sería la utilización de una sola tubería para bombear y turbinar este flujo de agua, pero para no quedar fuera de servicio si está sufriera una avería, fueron necesarias la instalación de una pareja de tuberías.

Las pérdidas de carga se pueden calcular utilizando la fórmula de Darcy (5.8).

$$\Delta H_I = \beta * \frac{Q_I^2 * L}{D^5} \quad (5.8)$$

Donde:

$\Delta H_I$ : Pérdidas de carga (m).

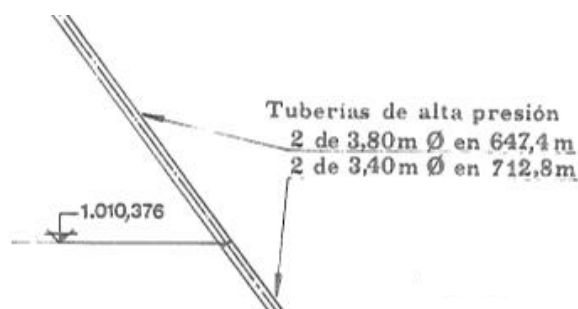
$Q_i$ : Caudal (m<sup>3</sup>/s).

$L$ : Longitud (m).

$D$ : Diámetro (m).

$\beta$ : 0.002 para tuberías soldadas y 0.0025 para tuberías roblonadas.

Como el diámetro de las tuberías que unen el embalse inferior con la central cambia de diámetro en la cota 1010.376, las pérdidas de carga se calcularán en dos tramos. La Figura 5.3 muestra el cambio de diámetro de las tuberías.



**Figura 5.3.** Cambio en el diámetro de las tuberías.

- Primer tramo. Aplicando la fórmula de Manning el caudal máximo que puede circular por una tubería de 3.4 metros de diámetro es 17.3085 m<sup>3</sup>/s. Las pérdidas de carga del primer tramo son (5.9).

$$\Delta H_{I1} = 0.0025 * \frac{17.3085^2 * 712.8}{3.4^5} = 1.175 \text{ m} \quad (5.9)$$

En el primer tramo, las pérdidas de carga son 2.35 metros ya que se tienen dos tuberías.

- Segundo tramo. Aplicando la fórmula de Manning el caudal máximo que puede circular por una tubería de 3.8 metros de diámetro es 23.2848 m<sup>3</sup>/s. Las pérdidas de carga del segundo tramo son (5.10).

$$\Delta H_{I2} = 0.0025 * \frac{23.2848^2 * 647.4}{3.8^5} = 1.107 \text{ m} \quad (5.10)$$

En el segundo tramo, las pérdidas de carga producidas por las dos tuberías son 2.214 metros.

Por tanto, las pérdidas de carga totales son  $2.214 + 2.35 = 4.564$  metros. Teniendo en cuenta que la altura del salto se encuentra entre 288 y 341 metros, el error relativo está definido en las expresiones (5.11) y (5.12).

$$\text{Error relativo máximo} = \frac{4.564}{288} * 100 = 1.585\% \quad (5.11)$$

$$\text{Error relativo mínimo} = \frac{4.564}{341} * 100 = 1.338\% \quad (5.12)$$

Las pérdidas máximas producidas solo aportan entre el 1.338% y 1.585% del total del salto, es decir, menores del 4% recomendado.

## 5.6 Caudal.

Al igual que existen diferentes saltos, existen diferentes caudales:

- Caudal máximo. En turbinación será de 31m<sup>3</sup>/s y en bombeo de 24.5m<sup>3</sup>/s.
- Caudal mínimo. El caudal mínimo en ambos modos dependerá del caudal mínimo que puedan mover las turbinas Francis reversibles en su curva de rendimiento que se explicará más adelante.
- Caudal de servidumbre (Q<sub>sr</sub>). Es el caudal necesario que se suelta al río Torina para mantener su cauce normal. El caudal máximo que puede fluir por la toma son 3.3m<sup>3</sup>/s, pero se tomará su valor medio 1.65m<sup>3</sup>/s puesto que dicho caudal depende no solo de la época del año en la que se esté sino de la situación meteorológica diaria.
- Caudal de equipamiento (Q<sub>e</sub>). Se corresponde al caudal medio que puede mover la instalación menos el caudal de aprovisionamiento del río (5.13).

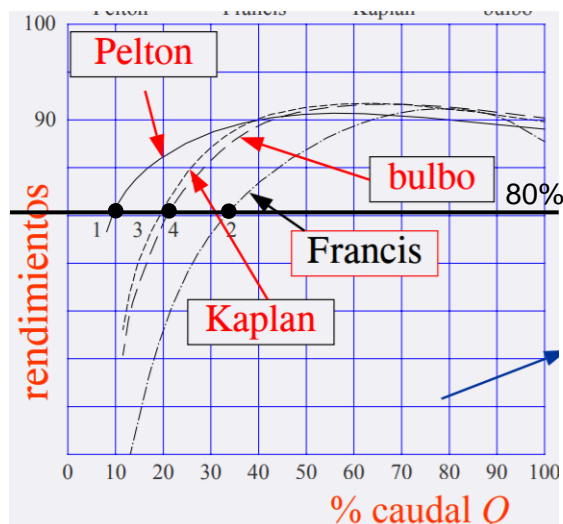
$$Q_E = Q_{MEDIO} - Q_{SR} \quad (5.13)$$

En el caso de la central de Aguayo, el agua de ambos depósitos se utiliza en circuito cerrado, el agua del caudal de servidumbre no circula por la turbina ya que la presa de Alsa tiene una tubería de toma del canal de Torina (la cota de la boca de la tubería se encuentra a 801.72 metros). Por lo que el caudal de servidumbre será cero y el caudal de equipamiento y el caudal medio serán iguales (5.14).

$$Q_E = Q_{MEDIO} \quad (5.14)$$

- Caudal mínimo técnico (Q<sub>mt</sub>). Cada tipo de turbina tiene un rango de caudal de funcionamiento y por debajo de un flujo mínimo de agua el rendimiento no es aceptable. Este caudal mínimo es aproximadamente.
  - Pelton K=0.1
  - Kaplan K=0.22
  - Francis K=0.35

Estas constantes, se obtienen observando la Figura 5.4 donde se relaciona el caudal nominal de la turbina con el rendimiento.



**Figura 5.4.** Curva caudal - rendimiento.

Se entiende por un rendimiento no aceptable cuando es inferior del 80%. Analizando la gráfica, para las turbinas Pelton ocurre con un 10% del caudal de diseño, con las turbinas Kaplan en torno al 22% del caudal nominal y con las turbinas Francis en un 35%.

Como las turbinas instaladas son Francis reversibles, estos caudales quedan definidos en las ecuaciones (5.15) y (5.16).

$$Q_{MTTURBINACIÓN} = K * Q_E = 0.35 * 31 = 10.85 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.15)$$

$$Q_{MTBOMBEO} = K * Q_E = 0.35 * 24.5 = 8.575 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.16)$$

En el modo automático por debajo de esos caudales no se permitirá la apertura de las válvulas ni para generación ni para consumo, en cambio, en modo manual, la apertura de las válvulas podrá ser cualquier en el rango entre el 0 y 100%, ya que a día de hoy, la empresa que está explotando la central, busca conseguir el mayor beneficio económico posible y trabaja de forma bastante frecuente con caudales que se encuentran por debajo de las curva de rendimiento de las turbinas.

## 5.7 Lógica difusa.

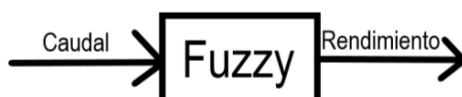
Para poder tener el rendimiento exacto que tiene la turbina para cada caudal, se ha generado la curva de rendimiento de las turbinas Francis de la estación mediante un sistema de lógica difusa Fuzzy [11].

A diferencia de la lógica binaria, que solo permite dar un valor bajo o valor alto de realidad, la lógica difusa emplea valores continuos que van desde 0 (totalmente falso) hasta 1 (totalmente cierto). De esta forma, la lógica binaria sería un caso muy particular de la lógica difusa.

Los conceptos se asocian a conjuntos difusos, asociándolos como valores de pertenencia, dicho proceso se llama fuzzificación. Después de tener los valores fuzzificados se trabaja con reglas lingüísticas para obtener una salida.

### 5.7.1 Rendimientos Fuzzy.

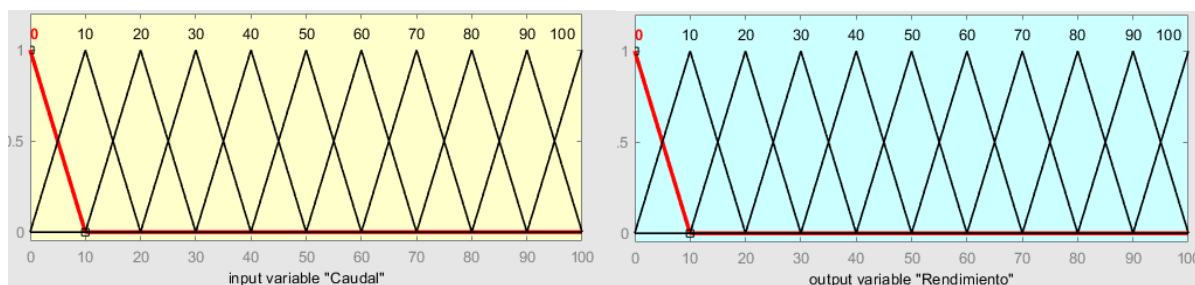
Para crear un archivo Fuzzy dentro de Matlab, primero hay que definir el número de entradas y salidas (Figura 5.5).



**Figura 5.5.** Diagrama de bloques del sistema.

Para ajustar lo máximo posible la curva de rendimientos real a la obtenida por Fuzzy, tanto para el caudal como para el rendimiento se han utilizado 10 conjuntos difusos que avanzan en periodos del 10%, dentro de un rango 0-100%.

Se ha decidido utilizar las curvas triangulares puesto que con las rectangulares y gaussianas se han obtenido peores resultados. La Figura 5.6 muestra las curvas de pertenencia para el caudal y rendimiento.



**Figura 5.6.** Curvas de pertenencia.

En cuanto a las operaciones de los conjuntos difusos (unión, intersección y complemento) solo se ha utilizado la unión para definir las reglas que representan la superficie. En la Figura 5.7 se muestran las reglas de pertenencia, todas ellas utilizando la unión.

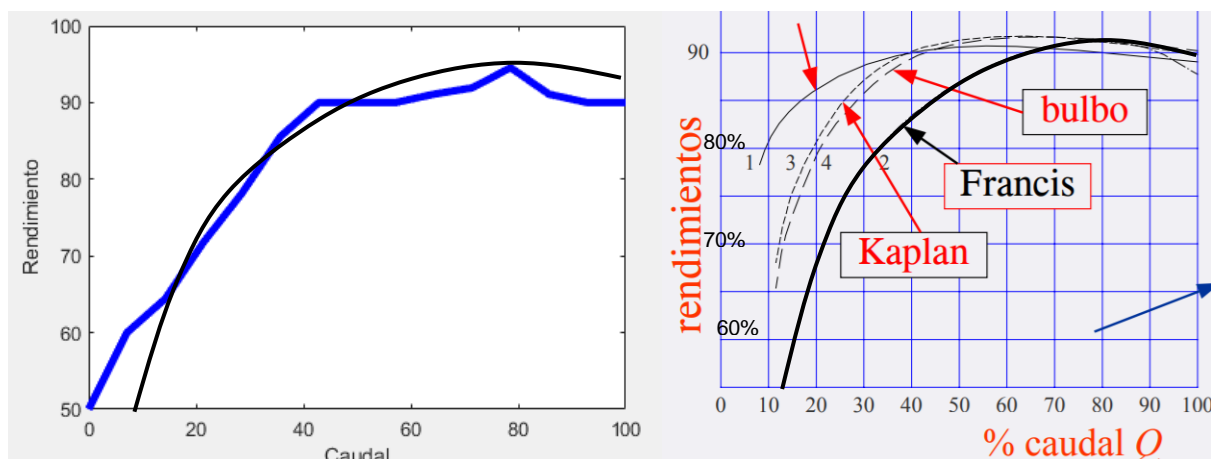
1. If (Caudal is 10) then (Rendimiento is 60) (1)
2. If (Caudal is 20) then (Rendimiento is 70) (1)
3. If (Caudal is 30) then (Rendimiento is 80) (1)
4. If (Caudal is 40) then (Rendimiento is 90) (1)
5. If (Caudal is 50) then (Rendimiento is 90) (1)
6. If (Caudal is 60) then (Rendimiento is 90) (1)
7. If (Caudal is 70) then (Rendimiento is 100) (1)
8. If (Caudal is 80) then (Rendimiento is 100) (1)
9. If (Caudal is 90) then (Rendimiento is 90) (1)
10. If (Caudal is 100) then (Rendimiento is 90) (1)



**Figura 5.7.** Reglas de pertenencia.

Como resultado se ha obtenido la superficie de la Figura 5.8.



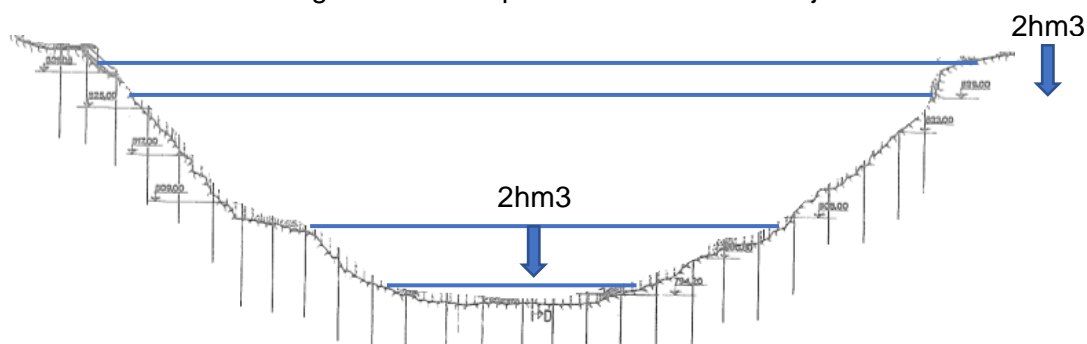


**Figura 5.8.** Comparación del resultado de la curva de rendimiento respecto a la realidad.

El rendimiento total de la instalación desde que se bombea el agua hasta que se turbinada ronda el 70%, puesto que, para completar un ciclo completo, el agua circula dos veces por la turbina/bomba que posee un rendimiento máximo en torno al 90% por cada paso, más pequeñas pérdidas en transformación, pérdidas de carga...

### 5.7.2 Altura del salto Fuzzy.

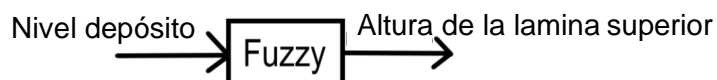
Como el perfil de los dos embalses es muy irregular y tiene forma de “cuenco” (Figura 5.9), la altura a la que se encuentra la lámina superior de agua no disminuye de forma lineal, sino que, con los depósitos bastante llenos, la altura disminuye de forma bastante menor, a si se pierde un mismo volumen de agua con los depósitos con reservas bajas.



**Figura 5.9.** Perfil embalse de Alsa con forma de “cuenco”.

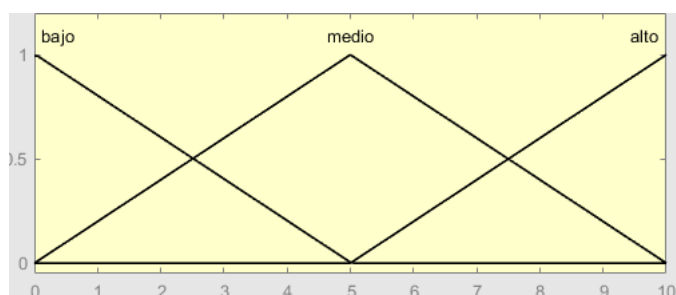
Por esta razón y para así poder conocer el salto de altura real entre las dos láminas de agua de ambos depósitos y calcular de forma mucho más precisa la potencia que se está generando o consumiendo, se han realizado dos archivos Fuzzy para cada depósito.

- Para el depósito superior, la Figura 5.10 representa el diagrama de bloques de las variables de entrada y salida:



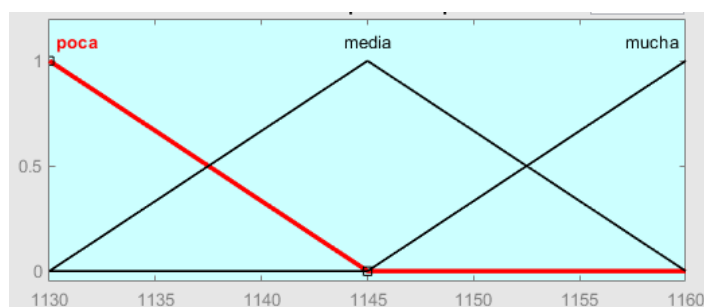
**Figura 5.10.** Diagrama de bloques del sistema.

Para el nivel del depósito (entrada) se han definido tres estados de forma simétrica; nivel bajo, nivel medio y nivel alto. Siendo su rango de 0 a 10, que se corresponde al rango de la capacidad del depósito superior (Figura 5.11).



**Figura 5.11.** Curvas de pertenencia del nivel del depósito.

Para la altura de la lámina superior de agua (Figura 5.12) se han definido la misma cantidad de estados que en el caso anterior, pero ahora, el rango varía entre 1130 metros (nivel mínimo depósito) y 1160 metros (nivel máximo depósito).



**Figura 5.12.** Curvas de pertenencia de la altura de la lámina superior de agua.

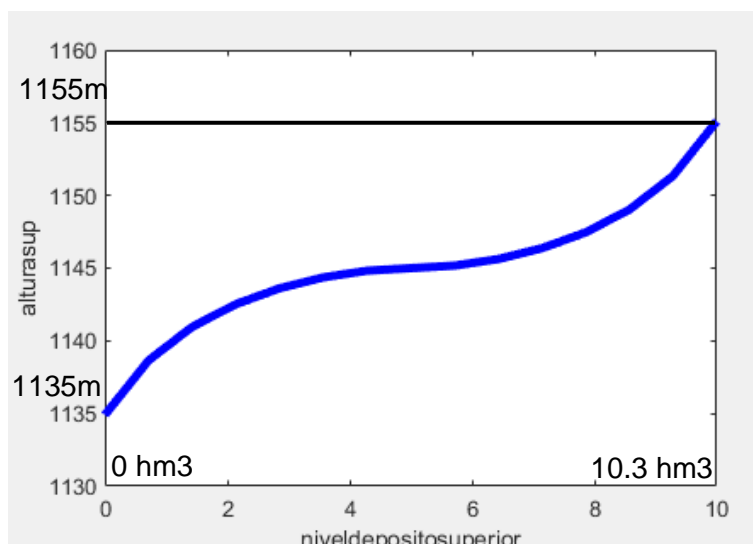
La Figura 5.13 muestra las reglas utilizadas.

```

1. If (niveldepositosuperior is bajo) then (alturasup is poca) (1)
2. If (niveldepositosuperior is medio) then (alturasup is media) (1)
3. If (niveldepositosuperior is alto) then (alturasup is mucha) (1)
  
```

**Figura 5.13.** Reglas de pertenencia.

Como resultado, se obtiene la siguiente superficie de variación de la cota de la lámina superior de agua en función del nivel del depósito (Figura 5.14).



**Figura 5.14.** Representación gráfica de la variación entre el nivel del depósito y el nivel del agua.

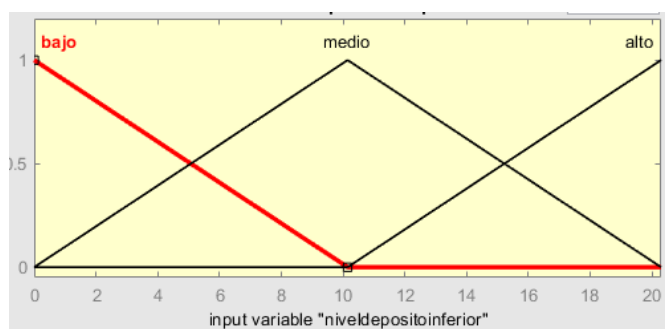
Como se puede comprobar, cuando el depósito este lleno, se obtiene una salida de 1155 metros de altura, cuando debería ser 1160 y lo mismo con el nivel mínimo. Este error de 5 metros se va a compensar con el error producido por el cálculo del depósito inferior, como se va a poder observar más adelante.

- Para el depósito inferior la Figura 5.15 representa el diagrama de bloques de las variables de entrada y salida. Se cuenta con el mismo diagrama de bloques del caso anterior.



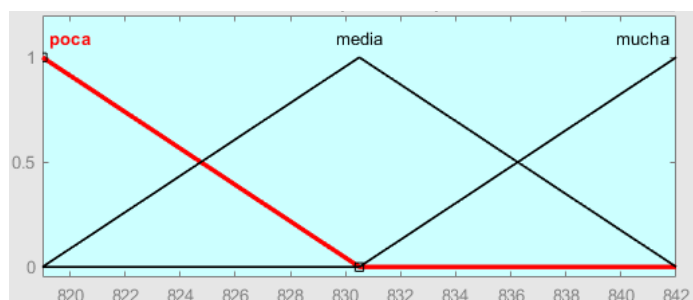
**Figura 5.15.** Diagrama de bloques del sistema.

Para el nivel del depósito (entrada) se han definido tres estados de forma simétrica; nivel bajo, nivel medio y nivel alto. Siendo su rango de 0 a 20.3, que se corresponde al rango de la capacidad del depósito inferior. La Figura 5.16 muestra las curvas de pertenencia para el nivel del depósito inferior.



**Figura 5.16.** Curvas de pertenencia del nivel del depósito.

Para la altura de la lámina superior de agua (Figura 5.17) se han definido los mismos estados que en el caso anterior, pero para el depósito inferior, el rango varía entre 819 metros (nivel mínimo depósito) y 842 metros (nivel máximo del depósito).



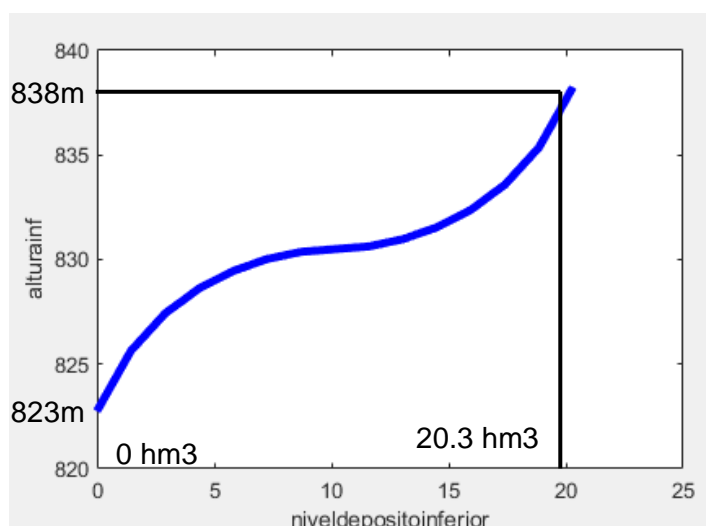
**Figura 5.17.** Curvas de pertenencia de la altura de la lámina superior de agua.

La Figura 5.18 muestra las reglas utilizadas.

```
1. If (niveldepositoinferior is bajo) then (alturainf is poca) (1)
2. If (niveldepositoinferior is medio) then (alturainf is media) (1)
3. If (niveldepositoinferior is alto) then (alturainf is mucha) (1)
```

**Figura 5.18.** Reglas de pertenencia.

Por último, la superficie que relaciona el nivel del depósito inferior con la altura de la lámina superior de agua se muestra en la imagen 5.19.



**Figura 5.19.** Representación gráfica de la variación entre el nivel del depósito y el nivel del agua.

Al igual que pasaba con el cálculo de la altura del depósito superior, cuando el embalse inferior está completo, la altura tiene que ser 842 metros, pero se obtienen 838 metros, una diferencia de 4 metros, prácticamente igual que en el caso anterior donde se obtenía un error de 5 metros.

Esta diferencia de cotas entre la real y la obtenida en el modelo no afecta al modelo final puesto que, lo que se utiliza para el cálculo de las potencias es la diferencia entre cotas, por

lo que los errores anteriores desaparecen y en el peor de los casos el error sería de 1 metro, cuyo error es completamente despreciable respecto al conjunto de altura como se demuestra en las expresiones (5.17) y (5.18).

$$\frac{\text{Error máximo}}{\text{Salto bruto máximo}} = \frac{1}{341} * 100 = 0.293\% \text{ de error} \quad (5.17)$$

$$\frac{\text{Error máximo}}{\text{Salto bruto mínimo}} = \frac{1}{288} * 100 = 0.347\% \text{ de error} \quad (5.18)$$

Como se puede comprobar, este error se mueve en un rango máximo de entre 0.293 y 0.347%.

## 5.8 Demanda eléctrica.

El objetivo de las centrales de bombeo [13] es almacenar electricidad durante las horas de baja demanda donde se producen excedentes y la electricidad es más barata (horas valle) y devolverla a la red en los momentos de demanda, que coincide con las horas punta, donde el precio de la electricidad es mayor.

Económicamente hablando las variaciones de potencia a lo largo del día provocan un bajo aprovechamiento del conjunto de la instalación, debido a que la propia instalación genera una inmovilización importante de capital y unos costes fijos bastante altos.

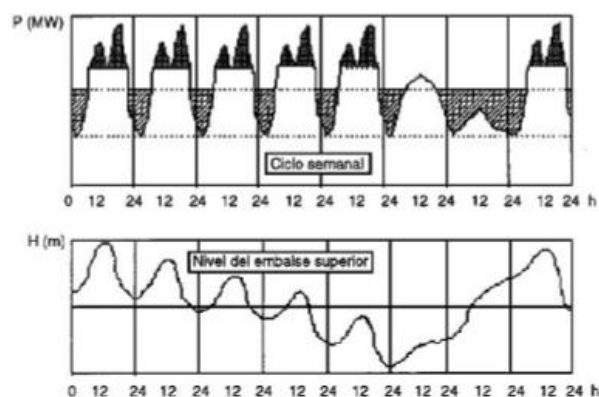
Como la potencia que se genera/consume no tiene un valor constante, se necesitan unos reguladores de potencia en las turbinas para poder adaptarse rápidamente a la demanda en cada momento. En este proyecto para poder simular dicha variación del caudal que circula a través de la turbina en cada momento, se utilizará la carga que reciben las turbinas como elemento de regulación, aumentándola y disminuyéndola en la cantidad exacta para satisfacer o consumir la potencia adecuada en cada instante.

Aunque el MWh tiene una variación de precio a lo largo del día estas centrales se encargan de nivelar el consumo eléctrico durante el día creando esta demanda artificial (consumo de excedentes) durante las horas valle.

El ciclo de llenado del embalse superior puede ser diario, semanal o estacional. El embalse de Alsa funciona bajo un ciclo de funcionamiento semanal y tarda en torno a 33 horas en llenar desde el nivel mínimo al nivel máximo el depósito superior.

Estrictamente hablando, el funcionamiento de una central hidroeléctrica de ciclo semanal (Figura 5.20), hace que se turbine durante los cinco días laborables de la semana durante las horas punta y se bombea; durante esas noches en las horas valle y los fines de semana puesto que la demanda eléctrica es menor.

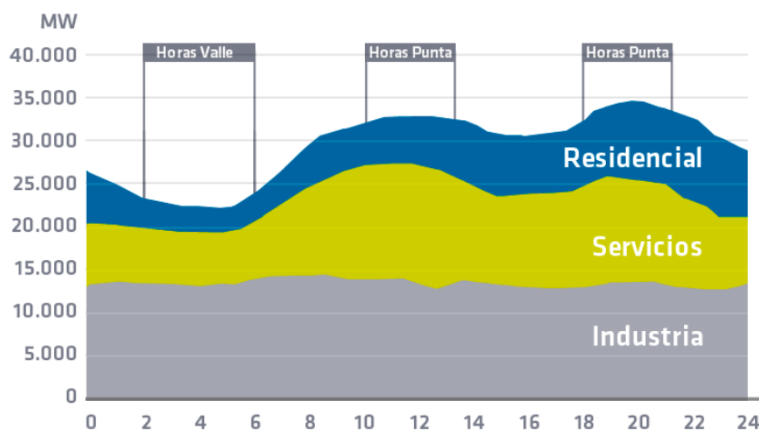
Aunque en la realidad, el funcionamiento no es tan ortopédico ya que depende de las muchas variaciones producidas en la red a lo largo del tiempo.



**Figura 5.20.** Bombeo de ciclo semanal (Fuente: Centrales eléctricas I, Ángel Luis Orille).

### 5.8.1 Consumo energético.

Como no se ha podido conseguir ningún fichero con la información de la potencia real de Alsa que demanda la red en cada momento. Se ha realizado un programa que simula la demanda y excedencia eléctrica de la red según los hábitos de consumo de nuestra sociedad [12].



**Figura 5.21.** Demanda energética española media por horas.

Nuestra sociedad consume más o menos energía en función de la hora del día (Figura 5.21). De esta manera se ha hecho un programa que es capaz de diferenciar entre cinco periodos en función de la hora del día:

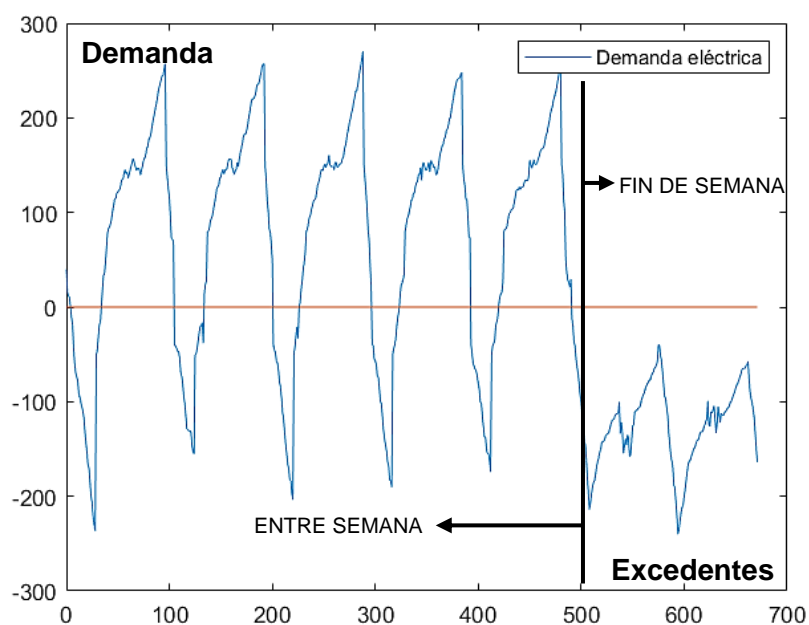
- El primer periodo son las horas valle, que comprenden el intervalo de 2 a 6 de la madrugada, donde claramente se produce un descenso de la demanda eléctrica debido a la reducción del consumo por parte del sector residencial y del sector servicios. En este periodo se tiene que encontrar el pico de excedentes.

No se comporta así el sector industrial ya que es prácticamente constante durante todas las horas del día.

- El segundo periodo está formado por las horas comprendidas entre el bloque de horas valle y el primer bloque de horas punta, es decir, de 6 a 10 de la mañana. En este tramo se produce un fuerte aumento de la demanda, ya que coincide con el comienzo del turno de trabajo de mañana en el sector servicios.
- El tercer periodo serán las horas comprendidas entre ambos periodos de hora punta, es decir de 10 a 14 y de 18 a 21 donde la demanda alcanzará los valores más altos del día.
- El cuarto periodo se corresponde con el tramo que se encuentra entre los bloques de horas punta donde la demanda será alta, pero variando con pequeñas subidas y bajadas.
- El quinto y último periodo, agrupa las horas 21 a 2 donde se produce una fuerte reducción de la demanda eléctrica y se producen excedentes.

Puesto que la potencia máxima de la central de Aguayo en turbinación es de 339 MW y bombeo de 339.2MW, en esta simulación la demanda máxima será de 339MW y los excedentes máximos de -339.2MW, de forma que la potencia demanda por la red en cada instante se encontrará dentro de este rango.

Además, el programa cuenta con un detector para conocer si el día en el que se encuentra es fin de semana. Para este caso los excedentes dominarán sobre la demanda en la mayor parte del día porque el consumo durante los fines de semana por parte de la población española es menor, como se puede comprobar en la Figura 5.22.



**Figura 5.22.** Demanda energética del modelo.

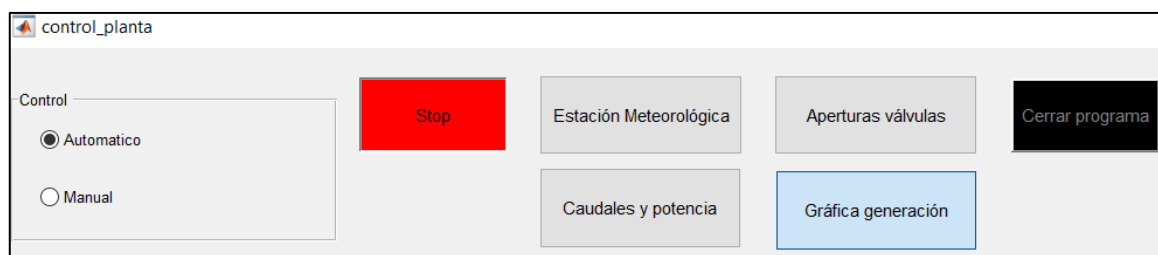
Observando la última imagen, se puede observar la demanda eléctrica de la red durante una semana completa; los cinco primeros días de entre semana y los dos siguientes del fin de semana, donde se puede comprobar el cambio en la tendencia. En esta gráfica, se muestra la demanda (positivo) y los excedentes (negativo).

El sistema que se utiliza toma muestras de la realidad cada 15 minutos, por una razón que se explicará más adelante, el instante 0 se corresponde a las 00:00 horas y el instante 96 (última muestra) equivale a las 23:45 horas. La expresión (5.19) muestra el número de muestras que conforman un día.

$$N^{\circ} \frac{\text{muestras}}{\text{día}} = 24 \text{ horas} * 4 (15 \text{ minutos/h}) = 96 \quad (5.19)$$

Como se puede comprobar en la Figura 5.24, se representa de forma bastante fiel las variaciones provocadas por la demandada lo largo del día, recreando esas pequeñas ondulaciones provocadas por la demanda y mostrando claramente el intervalo donde existen excedentes y demanda, teniendo en cuenta, que la carga diaria de la demanda siempre es mayor que la de los excedentes, salvo en los fines de semana.

En el programa creado, se puede observar en tiempo real la potencia de la red en cada instante, la potencia generada por la red en cada instante y el histórico del día gráficamente en el panel “Gráfica generación”. En la Figura 5.23, se muestra en color azul, el botón que muestra el panel de la generación eléctrica.



**Figura 5.23.** Menú de control del Embalse.

## 5.9 Estación meteorológica.

Para poder conocer fenómenos como la evaporación o precipitación se ha conseguido el fichero de la información meteorológica de la central de Aguayo. El fichero que se ha proporcionado para este proyecto contiene la información sobre los parámetros que se enumeran a continuación, con un tiempo de muestreo de 15 minutos.

- Temperatura.
- Espesor de la nieve.



- Humedad.
- Precipitación.
- Radiación solar.
- Dirección del viento.
- Temperatura máxima.
- Temperatura mínima.
- Velocidad del viento.
- Racha de viento.
- Sensación térmica.

La figura 5.24 muestra una pequeña parte del fichero de información de la central hidroeléctrica de Aguayo.

6	Fecha	Hora	Temperatura	Altura de nivel	Humedad (%)	Pluviometría	Radiación S	Batería (%)	Dirección d	Temperatura	Temperatura	Velocidad	c	Racha de v	Sensación T	Radiación S	Alimentación
7	01/03/2020	00:00	6,942	0	64,83	0	2,815	78,231	123,7	7,138	6,774	4,007	11,538	6,528	2,857	1	
8	01/03/2020	00:15	6,741	0	68,88	0	2,817	78,231	142	6,804	6,642	7,29	15,419	5,476	2,852	1	
9	01/03/2020	00:30	6,744	0	68,55	0	2,817	78,231	129,9	6,834	6,673	11,516	22,579	4,642	2,861	1	
10	01/03/2020	00:45	6,6	0	71,54	0	2,816	78,231	134,8	6,714	6,5	9,734	18,662	4,783	2,864	1	
11	01/03/2020	01:00	6,39	0	73,62	0	2,817	78,231	139,7	6,512	6,29	10,634	19,44	4,372	2,855	1	
12	01/03/2020	01:15	6,234	0	74,74	0	2,818	78,231	143,1	6,31	6,168	12,186	19,685	3,82	2,863	1	
13	01/03/2020	01:30	6,01	0	76,81	0	2,815	78,231	158,1	6,158	5,926	8,971	18,77	4,269	2,848	1	
14	01/03/2020	01:45	5,83	0	79,21	0	2,812	78,231	153	5,926	5,795	8,201	17,888	4,307	2,85	1	
15	01/03/2020	02:00	5,807	0	80,2	0	2,813	78,231	141,7	5,824	5,764	8,028	16,546	4,282	2,848	1	
16	01/03/2020	02:15	5,662	0	84,9	0	2,811	78,231	138	5,764	5,532	8,741	19,332	3,972	2,854	1	
17	01/03/2020	02:30	5,535	0	84,1	0	2,812	78,231	129,2	5,572	5,482	10,476	23,321	3,464	2,85	1	
18	01/03/2020	02:45	5,639	0	81,9	0	2,807	78,231	130,1	5,805	5,542	10,138	21,028	3,64	2,855	1	
19	01/03/2020	03:00	5,876	0	79,95	0	2,807	78,231	121,2	5,937	5,824	12,128	22,086	3,545	2,855	1	
20	01/03/2020	03:15	5,911	0	80,2	0	2,808	78,231	120,1	5,966	5,845	9,666	19,897	4,001	2,852	1	
21	01/03/2020	03:30	5,899	0	80,6	0	2,809	78,231	130,5	5,946	5,866	10,948	23,249	3,791	2,854	1	
22	01/03/2020	03:45	5,797	0	80,2	0	2,808	78,231	141,5	5,886	5,714	8,654	23,674	4,188	2,861	1	
23	01/03/2020	04:00	5,681	0	80,6	0	2,805	78,231	128	5,795	5,604	7,006	17,287	4,435	2,843	1	
24	01/03/2020	04:15	5,689	0	80,4	0	2,81	78,231	99,7	5,764	5,643	7,438	18,594	4,366	2,846	1	
25	01/03/2020	04:30	5,805	0	79,29	0	2,81	78,231	142,4	5,876	5,704	12,168	22,615	3,411	2,841	1	
26	01/03/2020	04:45	5,733	0	80,7	0	2,806	78,231	149,7	5,785	5,704	14,173	29,844	2,961	2,841	1	
27	01/03/2020	05:00	5,727	0	82,8	0	2,81	78,231	147,9	5,845	5,583	11,236	25,261	3,525	2,855	1	
28	01/03/2020	05:15	5,619	0	83	0	2,81	78,231	155,5	5,653	5,583	14,296	28,541	2,896	2,855	1	
29	01/03/2020	05:30	5,738	0	82,7	0	2,809	78,231	151,4	5,805	5,643	13,734	27,166	3,066	2,852	1	
30	01/03/2020	05:45	5,809	0	84	0	2,811	78,231	136	5,886	5,734	11,128	26,035	3,7	2,85	1	
31	01/03/2020	06:00	5,664	0	84,7	0	2,807	78,231	146,9	5,724	5,583	10,386	24,944	3,704	2,838	1	
32	01/03/2020	06:15	5,528	0	83,6	0	2,808	78,231	147	5,562	5,491	12,852	29,484	3,082	2,841	1	

**Figura 5.24.** Fichero de datos de la estación de Aguayo.

El fichero aportado cuenta con una extensión de 43337 líneas de información, que engloba el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2019 y 31 de marzo de 2020.

Este fichero será leído e interpretado por el programa línea a línea para conocer los parámetros necesarios y calcular todos los fenómenos que se explicarán más adelante.

Debido a que el fichero de información toma muestras cada 15 minutos, el programa que se ha desarrollado tiene la siguiente equivalencia de tiempo.

**1 segundo de simulación = 15 minutos en la realidad**

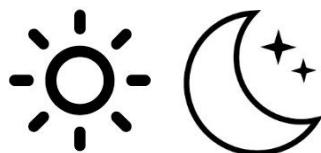
Para facilitar la comprensión de este sistema y dar al usuario una mayor información acerca de los fenómenos meteorológicos que rodean el embalse en cada momento, se ha habilitado un panel “Estación meteorológica”. En la Figura 5.25, se muestra en color azul, el botón que muestra el panel de la estación meteorológica.



**Figura 5.25.** Menú de control del Embalse.

Dicho panel, contiene la siguiente información.

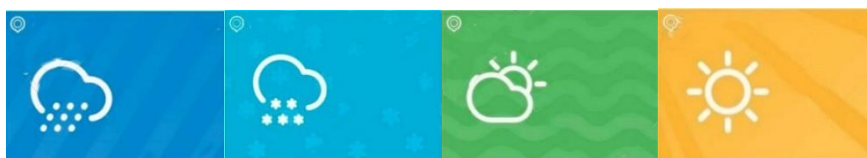
- Sensación térmica (°C).
- Temperatura (°C).
- Precipitación (l/mm2).
- Viento (km/h).
- Dirección viento (°).
- Espesor nieve (cm).
- Humedad relativa (%).
- Calendario. Donde se muestra la hora, día, mes y año.
- Imagen que según el nivel de radiación solar que se detecta, se informa si es de día o de noche mediante dos imágenes (Figura 5.26).



**Figura 5.26.** Imagen que muestra si es día o de noche.

- Situación meteorológica. Se distinguen cuatro posibles estados.
  - Nublado. Cuando la temperatura no supere los 15°C.
  - Soleado. Cuando se superen los 15 grados de temperatura.
  - Lluvioso. Cuando el pluviómetro detecte lluvia.
  - Nieve. Cuando se detecte un espesor de nieve superior a 0.1 cm.

La Figura 5.27 muestra los diferentes iconos con el tiempo que representan.

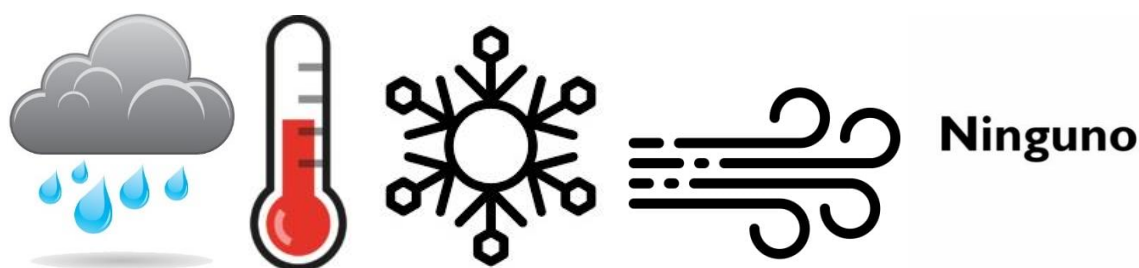


**Figura 5.27.** Iconos que indican la situación meteorológica.

- Avisos meteorológicos por situaciones peligrosas [17]. Se distinguen cuatro tipos de avisos cuyo umbral será elegido con la información de la dirección general de protección civil y emergencias proporcionada por el ministerio del interior.

- Viento. Con vientos superiores a 21 km/h, se encenderá el aviso por viento fuerte.
- Hielo. Cuando la temperatura sea inferior a  $-1^{\circ}\text{C}$ , saltará el aviso por hielo, el cual, es muy importante vigilar para que no se produzcan congelaciones de agua en el interior de las tuberías.
- Lluvia. Se activará el aviso por lluvia cuando esta supere los 15mm/hora, en nuestro caso, 3.75mm/15min
- Temperatura. Saltará el aviso por altas temperaturas cuando la temperatura supere los  $34^{\circ}\text{C}$ .
- Sin avisos. Cuando no se cumplan ninguno de los cuatros casos anteriores.

La Figura 5.28 muestra los diferentes avisos meteorológicos que pueden aparecer.



**Figura 5.28.** Iconos que indican una posible situación meteorológica adversa.

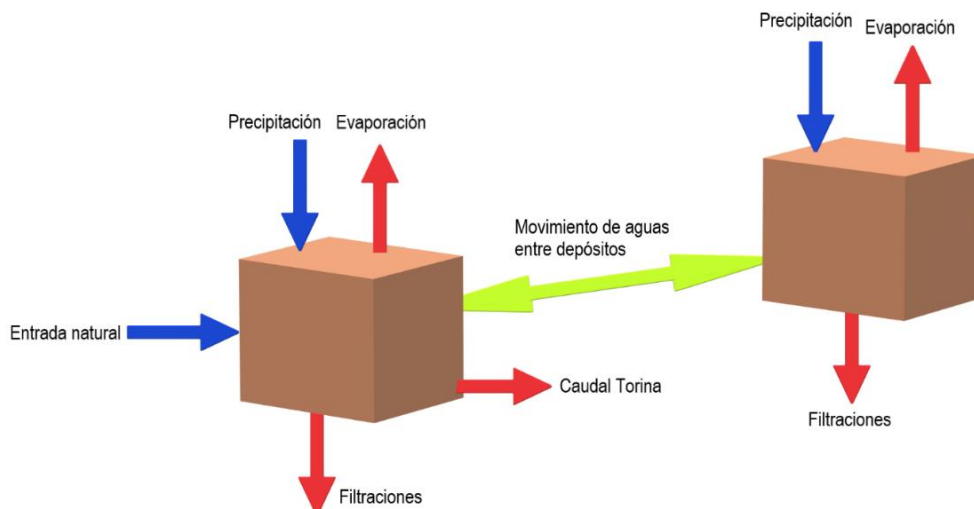
A continuación, la Figura 5.29 muestra el panel “Estación meteorológica”.



**Figura 5.29.** Panel de la estación meteorológica.

## 5.10 Control de los depósitos.

Para el control del volumen de agua almacenado en cada momento por ambos depósitos se ha utilizado el esquema de la Figura 5.30.



**Figura 5.30.** Modelo de los movimientos de agua para ambos depósitos.

Como la entrada natural que aprovisiona los embalse de Alsa y Mediajo no es ningún río ni similares, sino el conjunto de agua que no es capaz de filtrar la cadena montañosa que rodea el embalse inferior, se ha decidido despreciar esta aportación de agua, ya que, la información existente no es suficiente y el volumen aportado sobre el total es insignificante.

Por otro lado, no se ha realizado el cálculo de las pérdidas por filtraciones debido la falta de información y la poca transcendencia de este fenómeno sobre el volumen de agua total.

Además, estos dos fenómenos se compensan entre sí, teniendo una incidencia sobre el control del nivel de los depósitos prácticamente nula.

Los depósitos se encontrarán siempre en un porcentaje entre el 0 (completamente vacío) y 100 (completamente lleno) sobre su capacidad de almacenamiento útil:

- Volumen útil embalse inferior = 20.3 hm<sup>3</sup>.
- Volumen útil embalse superior = 10 hm<sup>3</sup>.

### 5.10.1 Caudal Torina.

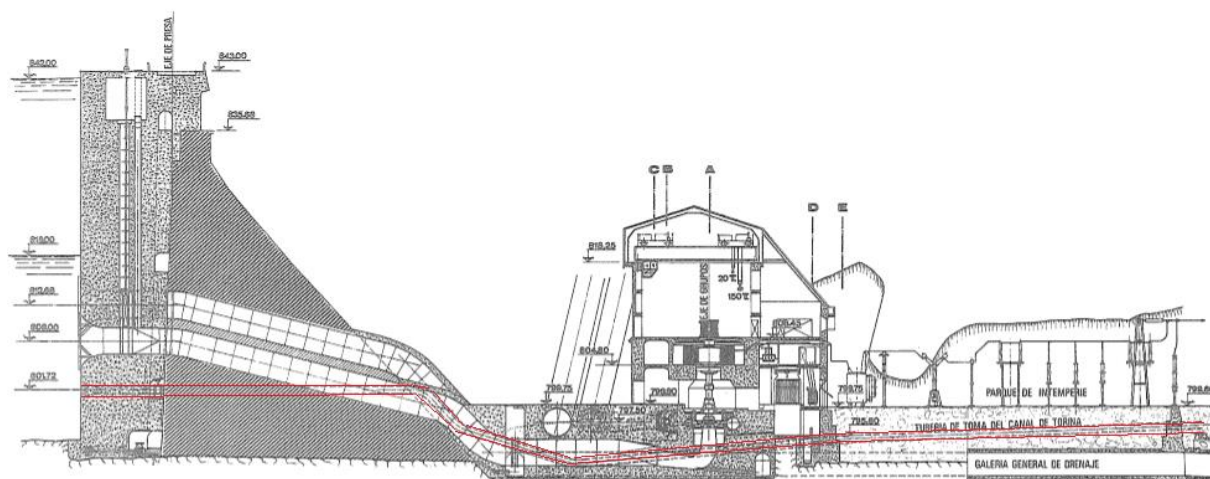
El río Torina es un corto curso fluvial de apenas 7 kilómetros de longitud que comienza en el embalse de Alsa y completa su recorrido en Bárcena de pie de concha sobre el río Besaya (Figura 5.31).



**Figura 5.31.** Senda fluvial del río Torina y ubicación.

Es un río con un caudal muy pequeño que se alimenta de la aportación de agua del embalse de Alsa y la acumulación de agua de las dos cadenas montañosas entre la que se encuentra.

El embalse de Alsa y la presa de Alsa tienen una toma para la alimentación del canal del Torina (Figura 5.32) que comienza en la cota 801.72 y finaliza en la cota 796.57, dicha tubería permite un caudal máximo de  $3.3\text{m}^3/\text{s}$  y no pasa por la turbina, es decir, no se realiza un aprovechamiento eléctrico de este caudal.

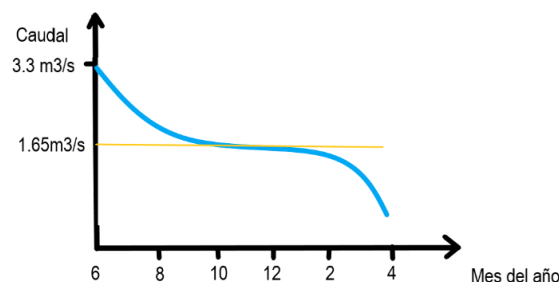


**Figura 5.32.** Tubería de toma del canal del Torina de la presa de Alsa (Fuente: Electra de Viesgo).

La gestión de este caudal la realiza la confederación hidrográfica del Besaya que realiza una aportación mínima en función de la época del año según una curva diaria que define la Comisión de Desembalse de la propia Confederación para garantizar agua para usos industriales en el Besaya durante el estiaje.

Como la aportación que va a realizar esta toma depende principalmente del mes del año en el que nos encontremos (también depende de otros factores, como los fenómenos meteorológicos), la aportación media que realiza a lo largo del año es de  $1.65\text{m}^3/\text{s}$  como se

muestra en la Figura 5.33. Por lo que las pérdidas de volumen de agua debido al caudal del Torina serán de 1.65m<sup>3</sup>/s.



**Figura 5.33.** Aportación del embalse de Alsa al canal del Torina según la época del año.

### 5.10.2 Evaporación.

La evaporación [14] es el conjunto de fenómenos que transforman el agua en vapor debido a un proceso físico. Los dos principales factores que influyen en la evaporación son:

- La energía que proporciona el sol, principalmente radiación solar.
- La velocidad del viento en la superficie.

Para calcular las pérdidas de fluido debido a la evaporación, existen diferentes, métodos, formulas y teorías, pero con la información de los ficheros de la estación meteorológica de Aguayo, solo ha sido posible utilizar la fórmula de Chistianssen y Guillen, cuya expresión es (5.20):

$$E = K * C_T * C_H * C_W * C_S * C_{DP} * C_M \quad (5.20)$$

Donde:

E: Evaporación en mm/día.

K: Constante 2.957.

C<sub>m</sub>: Coeficiente que varía en función del mes según la Figura 5.34.

Mes	C <sub>m</sub>	Mes	C <sub>m</sub>
Enero	0.991	Julio	1.033
Febrero	1.035	Agosto	0.997
Marzo	1.036	Septiembre	0.961
Abril	1.065	Octubre	0.947
Mayo	1.038	Noviembre	0.925
Junio	1.045	Diciembre	0.968

**Figura 5.34.** Variación del coeficiente C<sub>m</sub> mensual.

$C_H = 2.12 - 1.75H^2$  Siendo H la humedad relativa promedio mensual.

$C_T = -0.490 + 0.0621T$  Siendo T la temperatura media mensual en °C.

$C_W = 0.728 + 0.0494V$  Siendo V la velocidad del viento sobre la superficie del agua en km/hora.

$C_{DP} = 1.15 - 0.015D_P$  Siendo  $D_P$  el número de días de precipitación durante un mes superiores a 1 mm.

$C_S = 0.53 + 0.784S$  Siendo S la insolación media mensual, que varía según el mes (Figura 5.35).

Mes	S	Mes	S
Enero	9.4/24	Julio	15/24
Febrero	10.5/24	Agosto	13.9/24
Marzo	12/24	Septiembre	12.5/24
Abril	13.5/24	Octubre	11/24
Mayo	14.7/24	Noviembre	9.7/24
Junio	15.4/24	Diciembre	9/24

**Figura 5.35.** Variación de la insolación media mensual.

La insolación es el conjunto del tiempo durante los cuales la radiación solar directa, supera el umbral de 120W/m<sup>2</sup>. Es en este tiempo cuando se produce la evaporación siempre y cuando el resto de condicionantes lo propicien.

Como el tiempo de muestreo de la estación meteorológica de Alsa es de 15 minutos la evaporación se calculará cada 15 minutos (mm/15min) y se actualizará su incidencia sobre los niveles de los depósitos.

Como para calcular los parámetros anteriores, se necesitan medias mensuales, hasta que se haya completado el primer mes de simulación, los valores medios de temperatura, humedad y precipitación se corresponderán a la media del tiempo durante el que se haya simulado el programa y una vez completado el primer mes de simulación, serán valores medios mensuales.

### 5.10.3 Precipitación.

La precipitación es todo el volumen de agua recogido sobre la superficie terrestre en forma de agua, nieve o granizo. Para este trabajo, la precipitación acumulada es toda la lluvia que cae directamente sobre la superficie de cualquiera de los dos embalses. Para obtener el



volumen de agua recogido, hay que conocer la superficie que ocupan cada uno de los dos depósitos y multiplicarla por los mm de lluvia caídos, como muestran las ecuaciones (5.21) y (5.22).

- Depósito superior.

- Superficie depósito superior = 44 hectáreas = 440000 m<sup>2</sup>.
- Lluvia medida en mm → 1mm= 1litro/m<sup>2</sup>

$$\text{Litros recogidos (l)} = 440000(\text{m}^2) * \text{precipitación}(\text{l/m}^2) \quad (5.21)$$

- Depósito inferior.

- Superficie depósito inferior = 170 hectáreas = 1700000 m<sup>2</sup>.
- Lluvia medida en mm → 1mm= 1litro/m<sup>2</sup>

$$\text{Litros recogidos (l)} = 1700000(\text{m}^2) * \text{precipitación}(\text{l/m}^2) \quad (5.22)$$

Al igual que ocurre con la evaporación, se calcula el volumen de agua obtenido por la lluvia cada 15 minutos en ambos depósitos.

#### 5.10.4 Movimiento de agua entre depósitos.

La última variable que entra en juego sobre el control del nivel entre los depósitos y afecta en mayor medida sobre todas las demás, son los propios movimientos de caudal producidos durante la turbinación y bombeo.

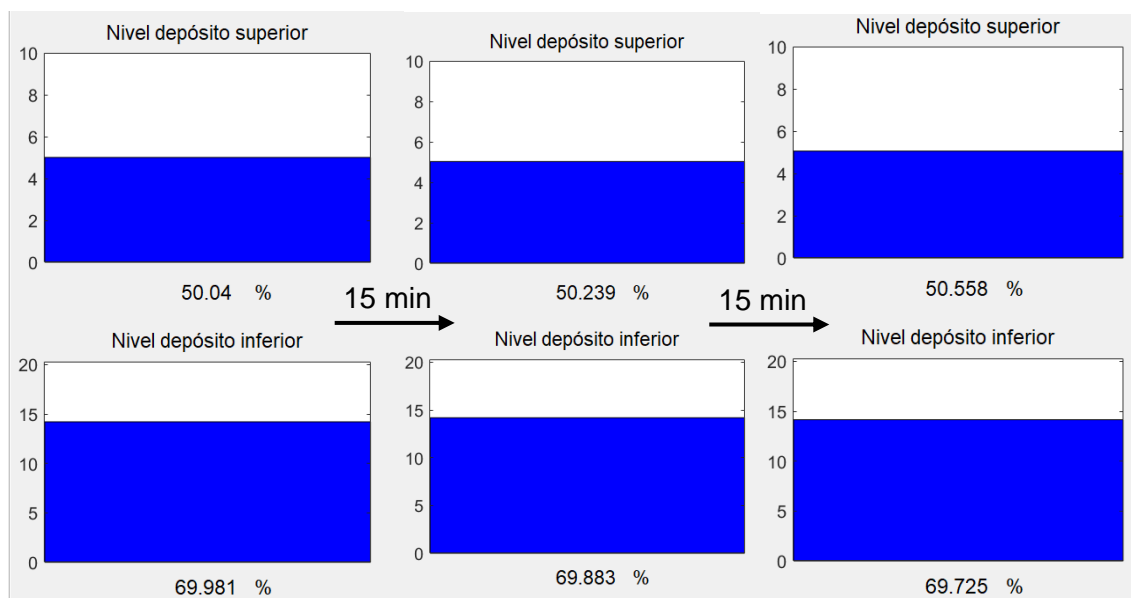
Como ya se ha comentado anteriormente, el caudal máximo que se permite en turbinación son 31m<sup>3</sup>/s y en bombeo 24.5m<sup>3</sup>/s. Debido a que el tiempo de muestreo es de 15 minutos, los caudales movidos, ya sea del depósito inferior al superior o viceversa se calculan para 15 minutos.

- Bombeo. El volumen de agua perdido por el depósito inferior, será recuperado por el superior, como muestra la ecuación (5.23).

$$\text{Caudal máximo} = 24.5 \text{ m}^3/\text{s} = 24.5 * 15 * 60 = 22050 \text{ m}^3/15\text{min} \quad (5.23)$$

- Turbinación. El volumen de agua turbinado desde el depósito superior, se almacenará en el depósito inferior, como muestra la ecuación (5.24).

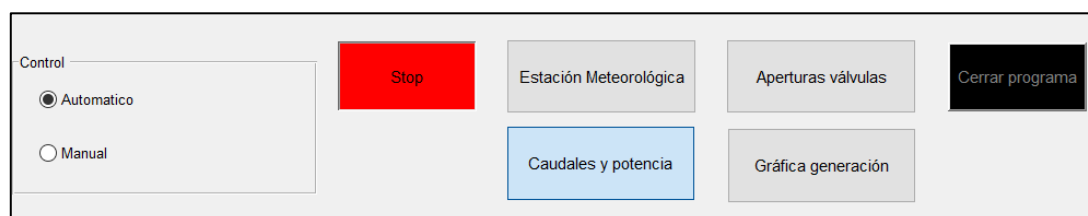
$$\text{Caudal máximo} = 31 \text{ m}^3/\text{s} = 31 * 15 * 60 = 27900 \text{ m}^3/15\text{min} \quad (5.24)$$



**Figura 5.36.** Actualización de los niveles de los depósitos con tiempo de muestreo 15 minutos.

La Figura 5.36 muestra el avance de las reservas de los depósitos superior e inferior. Además, para poder conocer los caudales que se están moviendo tanto por segundo como por cada 15 minutos se ha creado un panel “Caudales”.

En la Figura 5.37, se muestra en color azul, el botón que muestra el panel del caudal.



**Figura 5.37.** Menú de control del Embalse.

A continuación, la Figura 5.38 muestra el panel “Caudales”.

Caudales					
Caudal superior:	0	m3/s =	0	m3/15min	
Caudal inferior:	13.058	m3/s =	11752	m3/15min	

**Figura 5.38.** Panel “caudales”.

Aunque anteriormente se ha citado que el agua del embalse de Alsa-Mediajo funciona en circuito cerrado y no se utiliza para consumo humano en modo manual se han habilitado dos opciones para el desembalse de ambos depósitos.

#### 5.10.4.1 Bitrasvase del Ebro.

El Bitrasvase del Ebro-Besaya-Pas [16] es una instalación cuyo fin pretende garantizar el abastecimiento de agua durante el estiaje, entre las comarcas de Santander, Torrelavega y la zona oriental de Cantabria, cuando actúan de forma simultánea la mayor demanda del recurso hídrico y la menor disponibilidad y así reducir la sobreexplotación del Pas durante este periodo.

Como compensación, los excedentes hídricos producidos en la cuenca del Besaya serán almacenados en el embalse del Ebro a través de una serie de estaciones de bombeo. Hasta la aparición de la “autovía del agua”, el abastecimiento de agua en toda la zona norte de Cantabria era la que aparece en la Figura 5.39.



**Figura 5.39.** Sistema de abastecimiento previo a la autovía del agua.

Actualmente, el nuevo sistema de abastecimiento de agua está compuesto por 2 instalaciones, formadas por captaciones, potabilizadoras, depósitos y redes.



**Figura 5.40.** Sistema de abastecimiento de agua en Cantabria en la actualidad (Fuente: Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria).

Con una inversión de 76 millones de euros, su puesta en marcha estaba lista para julio de 2007, pero hasta agosto de 2010 no fue puesta en funcionamiento. La Figura 5.40 muestra la antigua infraestructura y la nueva.

La figura 5.41 muestra el resultado sobre el caudal del río Pas una semana después de la puesta en funcionamiento de este sistema.



**Figura 5.41.** Efecto de la recuperación sobre el río Pas.

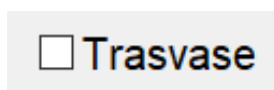
#### **5.10.4.2 Traslase.**

Antes de la finalización de la construcción de la autovía del Agua en Cantabria, el ayuntamiento de Torrelavega se abastecía del agua del embalse de Alsa, pero desde hace muchos años, esta práctica ya no se realiza.

En cambio, en Julio de 2019, debido a la sequía que estaba sufriendo Cantabria [15] en aquel verano, concretamente el núcleo urbano de Santander, debido a un fallo legal y de manera extraordinaria el embalse de Alsa abasteció el área de Santander. Argumentando que el consumo medio de la ciudad de Santander es de 1.6 hectómetros cúbicos de agua al mes y este aprovisionamiento temporal no iba a perjudicar el abastecimiento de las industrias del Besaya.

Esta derivación de agua temporal se realizó mientras se completaban los trámites entre el consejo de ministros y la confederación hidrográfica del Ebro para permitir la transferencia de 5 hectómetros cúbicos anuales a la cuenca del Cantábrico desde el embalse del Ebro.

Por esta razón y con el fin de poderse utilizar en situaciones excepcionales, en el control en modo manual, se ha habilitado una opción “Traslase” (Figura 5.42) que permite el desembalse de agua desde cualquiera de los dos depósitos.



**Figura 5.42.** Opción de traslase.

#### **5.10.4.3 Cuenca del Besaya.**

La confederación hidrográfica del Besaya se encarga del control del caudal del río Besaya y de abastecer su cuenca industrial (donde se encuentran empresas como Sniace, Solvay, Nissan...) turbinando desde la central de Torina durante el estiaje.

En cambio, en invierno, Repsol (empresa propietaria de la central hidroeléctrica de Aguayo) turbin todos los excedentes hídricos para no limitar la operatividad de Aguayo, es decir, en todo momento el embalse de Alsa tiene que ser capaz de poder almacenar todo el volumen de agua existente en el embalse de Mediajo, por lo que se intenta tener una capacidad en torno al 70% del total.

Para turbinar los excedentes de capacidad y no limitar el sistema, se ha habilitado una opción en modo manual “Cuenca Besaya” (Figura 5.43).

☐ Cuenca Besaya

**Figura 5.43.** Opción de la cuenca Besaya.

## 5.11 Apertura válvulas.

Las válvulas de esta central solo tienen dos estados posibles; completamente cerrado (0%) o completamente abierto (100%). Las válvulas no se abren en rangos intermedios debido a las grandes pérdidas que generan las turbulencias.

El caudal que reciben las turbinas, se puede regular aumentando o disminuyendo el chorro que expulsan los inyectores o modificando el ángulo de los álabes. Como las turbinas de la central de Aguayo son de tipo Francis, la regulación se realiza modificando el ángulo de incidencia de los álabes. Para simular esta regulación se ha utilizado la carga que reciben estas turbinas.

Esta carga está comprendida en un rango entre el 0 y 100% (Figura 5.44). Si se está turbinando, el caudal puede variar entre 0 y 31 m<sup>3</sup>/s, en cambio, si se está bombeando, el caudal irá de 0 a 24.5 m<sup>3</sup>/s. Si la carga de una válvula es distinta de cero, la apertura de la válvula será del 100%, en cambio, si la carga que se está aportando a la turbina es cero, la apertura de la válvula será cero.

Válvula inferior abierta		
Carga:	37.78	%
Apertura válvula:	100	%

**Figura 5.44.** Ejemplo del funcionamiento de la carga y la apertura de la válvula.

En modo automático, el caudal mínimo que permite activar la turbina, es el caudal mínimo técnico, obtenido anteriormente en las expresiones (5.15) y (5.16):

$$Q_{\text{MTTURBINACIÓN}} = K * Q_E = 0.35 * 31 = 10.85 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.15)$$

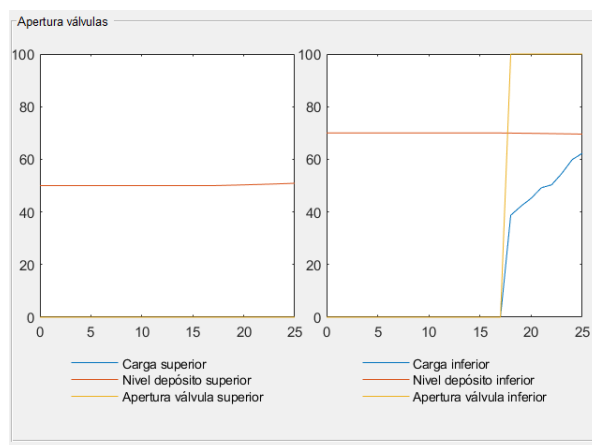
$$Q_{\text{MTBOMBEO}} = K * Q_E = 0.35 * 24.5 = 8.575 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.16)$$

Por encima de estos umbrales, en modo automático, la central estará generando o consumiendo. En cambio, en modo manual, se permite turbinar y bombear para cualquier rango de carga, es decir, se puede trabajar por debajo del 35% del caudal nominal.

Aunque la central hidroeléctrica de Alsa tenga dos tuberías que conectan el embalse superior con la central, no se permite trabajar en bomba y turbina al mismo tiempo, porque, aunque físicamente es posible y de hecho se han realizado pruebas, el saldo económico resultante sería la diferencia de potencias consumidas y generadas, lo que implicaría más horas de funcionamiento que conlleven un mayor gasto de mantenimiento.

Por esta razón, tanto en modo manual como en modo automático, solo una de las dos válvulas puede estar abierta.

Además, para tener una visión más sencilla de la apertura de las válvulas, carga y nivel de los depósitos en cada momento, se ha habilitado un panel “Apertura válvulas”, que cuenta con dos gráficas, donde se muestra el histórico de la carga de las turbinas, apertura de las válvulas y nivel de los depósitos (Figura 5.45).



**Figura 5.45.** Panel de la apertura de las válvulas.

En modo automático, la carga que recibe la turbina se calcula mediante las ecuaciones de potencia anteriormente explicadas para satisfacer la demanda eléctrica en cada momento, en cambio, en modo manual, la central deja de adecuarse a la demanda eléctrica de la red y el usuario puede abrir cualquiera de las dos válvulas en el porcentaje que precise, para ello, podrá utilizar tanto una barra deslizante como una caja donde introducir el porcentaje con el que se quiere cargar a la turbina (Figura 5.46).

Válvula superior cerrada

Carga: 0 %  
Apertura válvula: 0 %

0% 100

0

Estado de la turbina:  
Turbina parada

Excedentes eléctricos provenientes de energías renovables:  
Hay Excedentes eléctricos

Generación de potencia: 0 MW  
Potencia de la red: -222.14 MW

0% 100

0

Válvula inferior cerrada

Carga: 0 %  
Apertura válvula: 0 %

**Figura 5.46.** Barra deslizante y caja de interacción para la regulación de la carga en modo manual.

## 5.12 Fichero de registro.

Además, se ha implementado una función para almacenar el histórico de las siguientes variables y así dejar constancia de la actuación de todos los elementos de regulación de la central (Figura 5.47).

- Fecha.
- Hora.
- Nivel depósito superior (hm3).
- Nivel depósito inferior (hm3).
- Nivel depósito superior (%).
- Nivel depósito inferior (%).
- Carga superior (%).
- Carga inferior (%).
- Caudal válvula inferior (m3/15min).
- Caudal válvula superior (m3/15min).
- Caudal válvula inferior (m3/s).
- Caudal válvula superior (m3/s).

Para observar este histórico de datos, se ha habilitado una pestaña, que muestra el fichero de datos.



1	Fecha;Hora;Nivel deposito superior (hm3);Nivel deposito inferior (hm3);Nivel deposito superior (Porcentaje);Nivel deposito superior (Porcentaje);Carga
2	1/1/2019;00:30;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
3	1/1/2019;00:45;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
4	1/1/2019;01:00;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
5	1/1/2019;01:15;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
6	1/1/2019;01:30;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
7	1/1/2019;01:45;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
8	1/1/2019;02:00;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
9	1/1/2019;02:15;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
10	1/1/2019;02:30;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
11	1/1/2019;02:45;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
12	1/1/2019;03:00;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
13	1/1/2019;03:15;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
14	1/1/2019;03:30;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
15	1/1/2019;03:45;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
16	1/1/2019;04:00;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
17	1/1/2019;04:15;5.000000;14.210000;50.000000;70.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000;0.000000
18	1/1/2019;04:30;5.009000;14.201000;50.085000;69.958000;0.000000;38.720000;8538.000000;0.000000;9.487000;0.000000
19	1/1/2019;04:45;5.018000;14.192000;50.178000;69.912000;0.000000;42.170000;9299.000000;0.000000;10.333000;0.000000
20	1/1/2019;05:00;5.028000;14.182000;50.278000;69.863000;0.000000;45.190000;9965.000000;0.000000;11.072000;0.000000

Figura 5.47. Fichero de registro.

### 5.13 Instalación eléctrica y funcionamiento.

Para que el balance económico de la central de Aguayo sea rentable, el precio total de la energía turbinada tiene que ser mayor que la de la energía bombeada. La ecuación (5.25) muestra el saldo económico producido entre las horas punta y horas valle.

$$W_T * C_T > W_B * C_B \quad (5.25)$$

Siendo:

Wt: La energía generada.

Wb: La energía consumida.

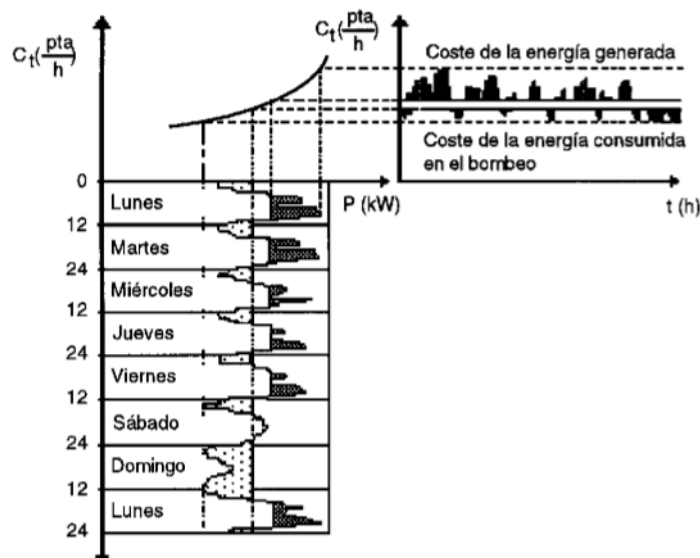
Ct: El coste de la energía de punta.

Cb: El coste de la energía de valle.

Como el rendimiento total de la instalación ronda el 70%, la expresión (5.26) define el rendimiento total de la operación.

$$W_T = \eta * W_B = 0.7 * W_B \quad (5.26)$$

Actualmente el precio del kWh en hora punta ronda los 0.159626€ y la hora valle 0.080432 aunque estos precios cambian prácticamente de forma diaria. En la Figura 5.48, se muestra la relación entre el precio de la hora valle y hora punta y el funcionamiento de la central desde el punto de vista económico.



**Figura 5.48.** Gráfico del funcionamiento económico de una central de bombeo (Fuente: Centrales eléctricas I, Ángel Luis Orille).

Los equipos de instalación en una central de bombeo pueden ser tres:

- Grupos cuaternarios. Formados por un alternador, turbina, motor y bomba.
- Grupos ternarios. Constituidos por un alternador-motor, turbina y bomba.
- Grupos binarios. Están formados por un alternador-motor y una turbina-bomba.

La central de Aguayo tiene cuatro grupos binarios, formados por cuatro turbinas Francis reversibles de 106MVA a 12kV que son capaces de funcionar tanto en turbina como en bomba y cuatro máquinas alternador-motor. Además, su disposición es de eje vertical (Figura 4.11).

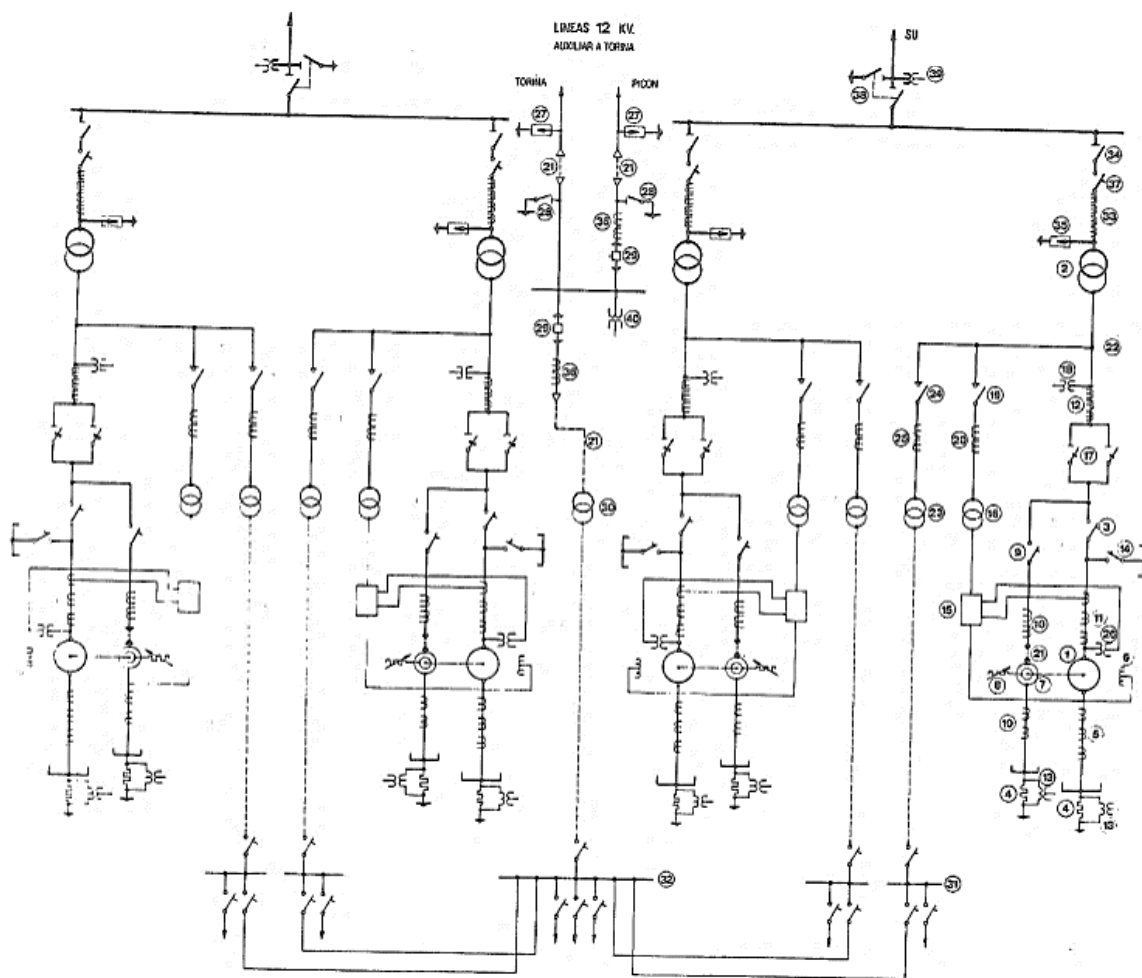
Las ventajas que presentan los grupos binarios son:

- Menor coste.
- Menores dimensiones.
- Menor obra civil.

Aunque sus inconvenientes son:

- Menor rendimiento. En torno a 4% menor respecto a una turbina Francis no reversible.
- Posibles vibraciones.
- Mayor tiempo de maniobra.

Hay diferentes tipos de arranque que pueden tener los grupos binarios, pero la central de Aguayo utiliza un motor de lanzamiento Pony de 12kV y 8000CV en sentido bomba por cada grupo. La Figura 5.49 muestra el esquema unifilar de la central hidroeléctrica de Aguayo.



**Figura 5.49.** Esquema unifilar de la central de Aguayo (Fuente: Electra de Viesgo).

Las características principales del equipamiento eléctrico de la central hidroeléctrica de Aguayo son:

- 4 alternador-motor de 106MVA de  $12 \pm 5\%$  kV y 500 rpm.
- 4 transformadores trifásicos de 106MVA a  $12/230 \pm 10\%$  kV.
- 4 interruptores de grupo de 17.5kV y 6000A.
- 4 motores de lanzamiento Pony de 12kV y 8000CV.
- 4 resistencias de arranque para cada motor Pony.
- 4 interruptores de 17.5kV y 1000A.
- 8 transformadores de intensidad de 300/5-5A de 17.5kV.
- 11 transformadores de intensidad de 5000/5-5-5A de 17.5kV.
- 4 transformadores de tensión de  $13200: \sqrt{3}/110$  V.
- 4 interruptores de frenado de 17.5kV y 6000A.
- 4 equipos de excitación estática y regulación de tensión.
- 4 transformadores trifásicos de  $12000 \pm 5\%/400$  V, 630kVA
- 8 seccionadores bipolares de 17.5 kV y 6000A.

- 8 transformadores de tensión de 13200:  $\sqrt{3}/110\text{V}$ :  $\sqrt{3}/110\text{V}$ :  $\sqrt{3}/110:3\text{V}$ .
- 4 seccionadores de 17.5kV y 1250A.
- 8 transformadores de intensidad de 60/5-5A de 17.5kV.
- 5 transformadores trifásicos de  $12000\pm 5\%/400\text{V}$ , 630kVA.
- 4 seccionadores de apertura con carga de 17.5kV y 1250A.
- 2 autoválvulas de 12kV.
- 2 seccionadores tripolares de 17.5kV para puesta a tierra.
- 2 interruptores de 15/25kV y 630A, 350MVA.
- 4 cuadros de servicios auxiliares de 400V.
- 1 cuadro de servicios auxiliares generales de 400V.
- 4 transformadores de intensidad de 250-500 5-5-5-5A de 245kV.
- 4 seccionadores tripolares de 245kV y 1600A.
- 4 autoválvulas de 245kV.
- 2 transformadores de intensidad de 50-100/5-5A de 17.5kV.
- 4 interruptores de 245kV y 2000A.
- 2 seccionadores trifásicos de 245kV con puesta a tierra, 1600A.
- 2 transformadores de tensión capacitivos de 220000:  $\sqrt{3}/110$ :  $\sqrt{3}/110$ :  $\sqrt{3}\text{V}$
- 1 transformador de tensión de 13200:  $\sqrt{3}/110$ :  $\sqrt{3}/110$ :  $\sqrt{3}\text{V}$ .

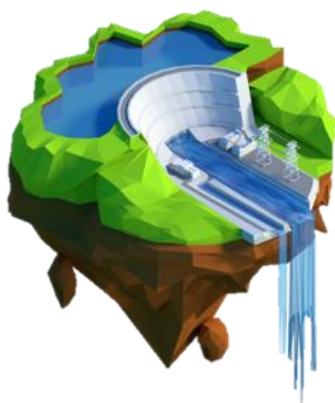
# Capítulo 6:

# **APLICACIÓN Y ESTUDIO ECONÓMICO**

## 6 Aplicación.

Una vez se ha completado el programa y todas las funciones, se ha utilizado la función “deploytool” de Matlab para realizar una aplicación autónoma. En el menú de esta función, se ha introducido la siguiente información:

- Autor.
- Correo electrónico del desarrollador.
- Funciones secundarias.
- Imágenes.
- Archivos con extensión txt y csv.
- Pantalla de carga.
- Logo.



**Figura 6.1.** Logo desarrollado para la aplicación.

Además, se ha utilizado una opción que permite al usuario utilizar el programa sin tener Matlab instalado, es decir, funcionar de forma independiente.

Por último, esta aplicación cuenta con tres elementos:

- Un instalador. Un ejecutable que instala el programa en el ordenador del cliente.

 Installer_Embalse_Alsa	17/06/2020 12:57	Aplicación	5.671 KB
--	------------------	------------	----------

- Un ejecutable para realizar pruebas y modificaciones en el código que no afectan a la versión final.
- La aplicación propiamente dicha.

 control_planta	17/06/2020 12:57	Aplicación	4.746 KB
--	------------------	------------	----------

## 6.1 Estudio económico.

En este apartado se va a desarrollar el estudio económico necesario para llevar a cabo este trabajo. Se va a desglosar por actividades y se valoran cada uno de los costes.

Consultando diferentes fuentes sobre el precio medio que cobra un ingeniero, incluyendo todos los impuestos, se ha establecido un precio por hora trabajada de 30€.

Concepto	Unidad	Precio	Total
Estudio del funcionamiento del embalse de Alsa	30		
Reuniones con el tutor del proyecto	15		
Estudio del funcionamiento de Matlab GUIDE	10		
Desarrollo de la interfaz gráfica	300		
Optimización y testeo	100		
Elaboración de la documentación	120		
<b>Total de horas del proyecto</b>	<b>575</b>	<b>30 €</b>	<b>17.250 €</b>
<b>Software</b>			
Matlab, Matlab Guide	1	800	800
<b>TOTAL PROYECTO</b>			<b>18050</b>



# Capítulo 7:

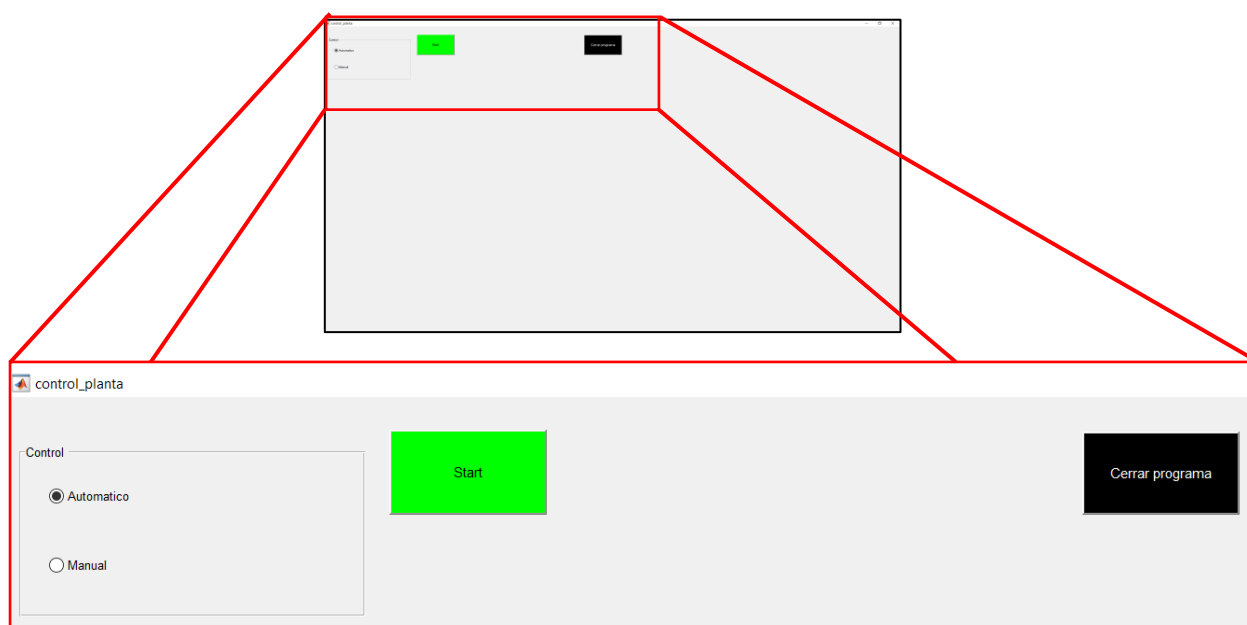
# **GUÍA DEL USUARIO**

## 7 Guía del usuario.

En este apartado se va a redactar una guía técnica para el correcto uso y comprensión del software de la central hidroeléctrica de Aguayo. Este programa tiene como objetivo principal posibilitar al usuario, el control de forma íntegra todos los elementos de regulación de la central y conocer lo que sucede en su entorno en tiempo real.

### 7.1 Descripción del funcionamiento.

Una vez se ha arrancado el programa (ejecutar archivo “control\_planta.m”), aparecerá la pantalla que se muestra en la Figura 7.1.



**Figura 7.1.** Pantalla principal de ejecución del programa.

En esta pantalla, aparecerán dos botones:

- Start. Permite arrancar el programa.
- Cerrar programa. Se cierra el programa y se guarda el registro. Solo se podrá cerrar el programa mientras la planta esté parada, cuando esté en funcionamiento, esta opción estará deshabilitada.

La aplicación cuenta con dos modos de funcionamiento según el tipo de necesidad en cada momento. Estos dos modos de funcionamiento son:

- Automático.
- Manual.

## 7.2 Funcionamiento en modo automático.

Al arrancar el programa, se mostrará la pantalla de control (Figura 7.2). Como se ha seleccionado el modo de control automático. El programa calculará automáticamente el porcentaje de carga que tiene que suministrar a las turbinas en cada momento para satisfacer la demanda de la red, siempre y cuando esta carga sea superior al 35%.

En este modo, el usuario no tiene que realizar ninguna acción, tan solo observará la situación de la central y comprobará que todo funcione correctamente. Podrá habilitar o deshabilitar cualquiera de los cuatro paneles (Estación meteorológica, apertura válvulas, caudales y gráfica generación), parar la simulación (pulsando “Stop”) o cambiar el modo de funcionamiento (Automático/Manual).



**Figura 7.2.** Pantalla de control en modo automático.

En esta pantalla, en la parte izquierda, se observan dos gráficos donde se muestra la capacidad de cada uno de los dos depósitos. En la parte superior derecha, se muestra el estado de la válvula superior. En la parte derecha central, se muestra el estado de la turbina, que estará parada cuando ambas válvulas estén cerradas y en funcionamiento cuando una de las válvulas este abierta. En esta misma zona se informará al usuario si existen excedentes en la red que provengan de energías renovables y cuál es el consumo o generación de electricidad por parte de la central. Por último, en la parte inferior derecha, se muestra el estado de la carga y la apertura de la válvula inferior. A continuación, la Figura 7.3 muestra diferentes momentos de la pantalla de control en modo automático.

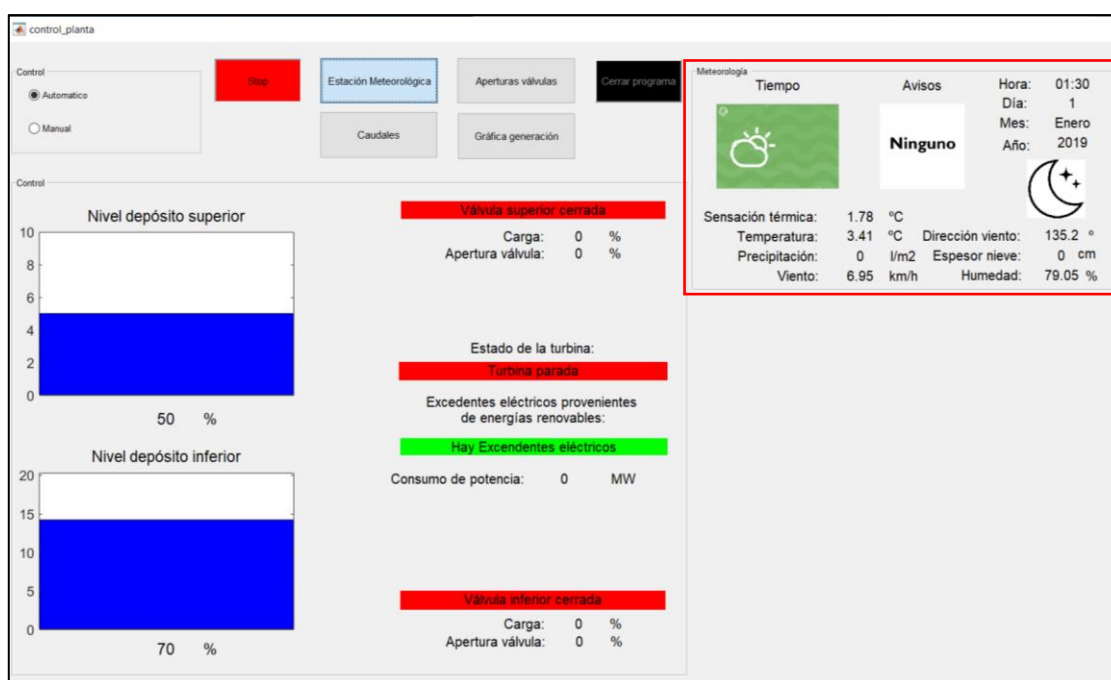


**Figura 7.3.** Diferentes estados de la pantalla de control en modo automático.

Por otro lado, en la parte superior central, se cuenta con unos botones que despliegan unos paneles con distinta información. Además, tal y como se ha comentado anteriormente, el botón “cerrar programa” se encuentra inhabilitado ya que la planta esta arrancada, para volver a habilitarlo, hay que pulsar en “stop”.

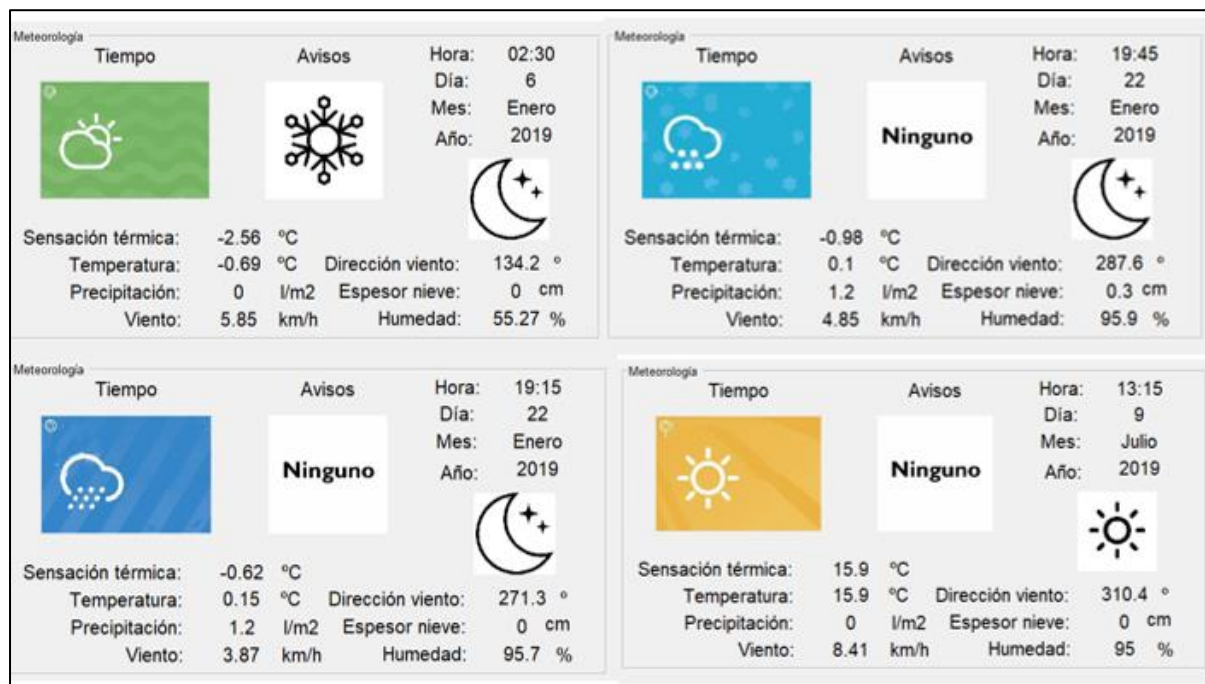
Si pulsamos algunos de los siguientes botones, aparecerá el siguiente desplegable:

- Estación meteorológica. Pulsando sobre este botón aparecerá el panel de la Figura 7.4, con la información meteorológica que rodea a la central y volviendo a pulsar desaparecerá.



**Figura 7.4.** Panel de la estación meteorológica.

A continuación, la Figura 7.5 muestra diferentes situaciones del panel de la estación meteorológica.



**Figura 7.5.** Diferentes momentos de tiempo de la estación meteorológica.

- Apertura válvulas. Seleccionando esta opción, se mostrará a la apertura de cada válvula (Figura 7.6), el porcentaje de carga de cada válvula y el nivel de cada uno de los depósitos.



**Figura 7.6.** Panel con la apertura de las válvulas.

- Caudales. Activando esta opción (Figura 7.7), se podrá conocer el caudal que está circulando por cada una de las tuberías en m<sup>3</sup>/s y m<sup>3</sup>/15min. Para ocultar este panel, será necesario volver a pulsar.



**Figura 7.7.** Panel caudales.

A continuación, la Figura 7.8 muestra diferentes situaciones momentos del panel caudales.

<p>Caudales</p> <p>Caudal superior: 0 m³/s = 0 m³/15min</p> <p>Caudal inferior: 17.673 m³/s = 15906 m³/15min</p>	<p>Caudales</p> <p>Caudal superior: 17.67 m³/s = 15903 m³/15min</p> <p>Caudal inferior: 0 m³/s = 0 m³/15min</p>
<p>Caudales</p> <p>Caudal superior: 24.409 m³/s = 21968 m³/15min</p> <p>Caudal inferior: 0 m³/s = 0 m³/15min</p>	<p>Caudales</p> <p>Caudal superior: 0 m³/s = 0 m³/15min</p> <p>Caudal inferior: 13.019 m³/s = 11717 m³/15min</p>

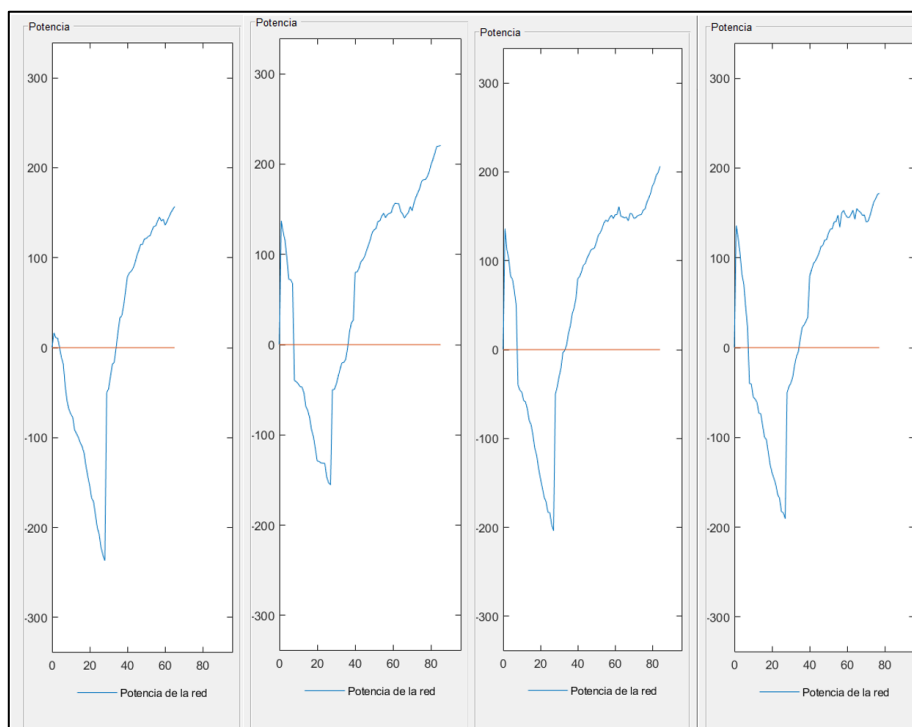
**Figura 7.8.** Diferentes momentos de la pestaña caudales.

- Gráfica generación. Este botón, permite ver una gráfica con el histórico de la situación eléctrica de la red durante un día natural (Figura 7.9).



**Figura 7.9.** Panel del histórico de la demanda eléctrica.

La Figura 7.10 muestra diferentes demandas eléctricas, todas ellas de días laborables.



**Figura 7.10.** Diferentes demandas eléctricas en días laborables.

Excepto el panel de control, todos los demás paneles se podrán mostrar y ocultar en todas las combinaciones posibles. La Figura 7.11 muestra la interfaz gráfica con todos los paneles activados.

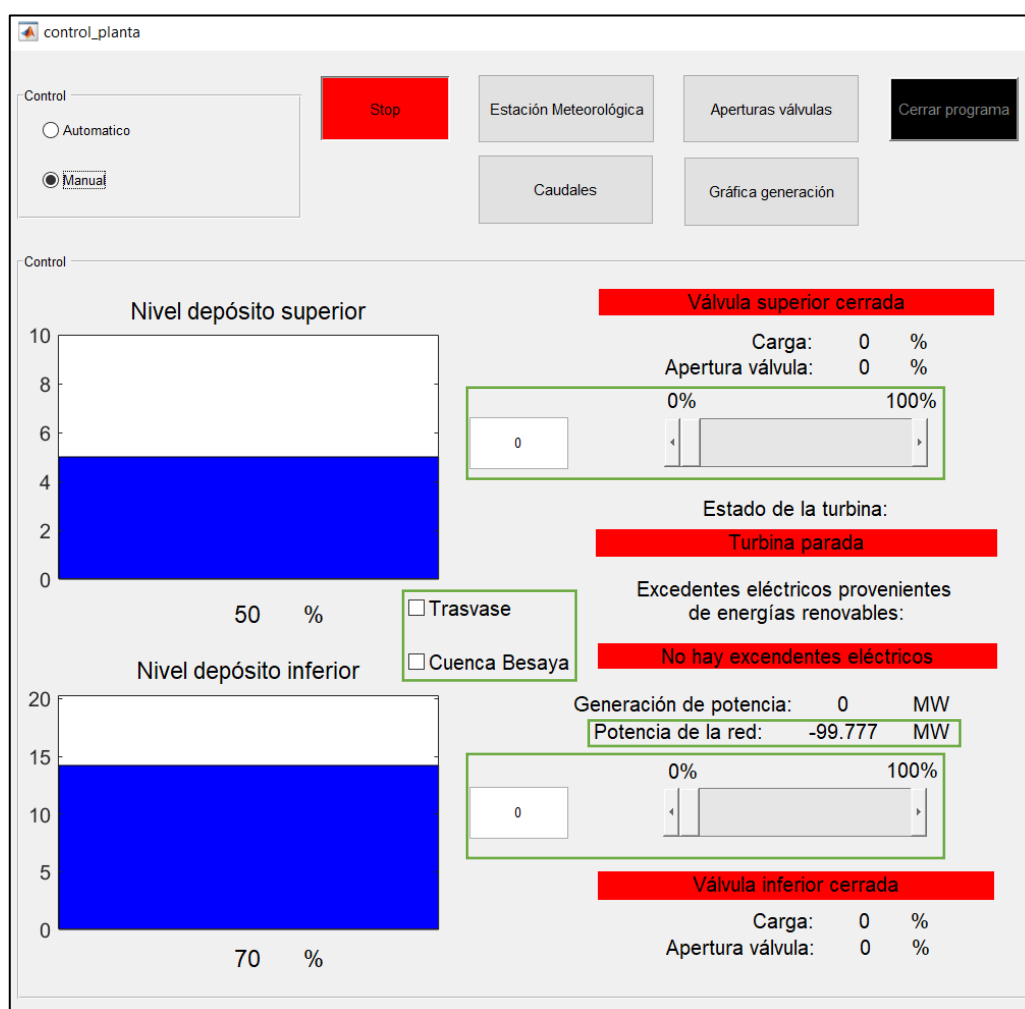


**Figura 7.11.** Distribución de todos los paneles activados simultáneamente.

### 7.3 Funcionamiento en modo manual.

Si se desea cambiar al modo de funcionamiento manual, esta acción se puede realizar en cualquier momento. Al seleccionar este modo, las aperturas de las válvulas y cargas de la turbina quedarán a 0 y aparecerán los elementos de interacción con el usuario para el control de la carga.

Como ya se ha comentado anteriormente, en este modo no hay un caudal mínimo que no permita la apertura de las válvulas y todos los paneles habilitados para el control automático también estarán activados en el control manual.



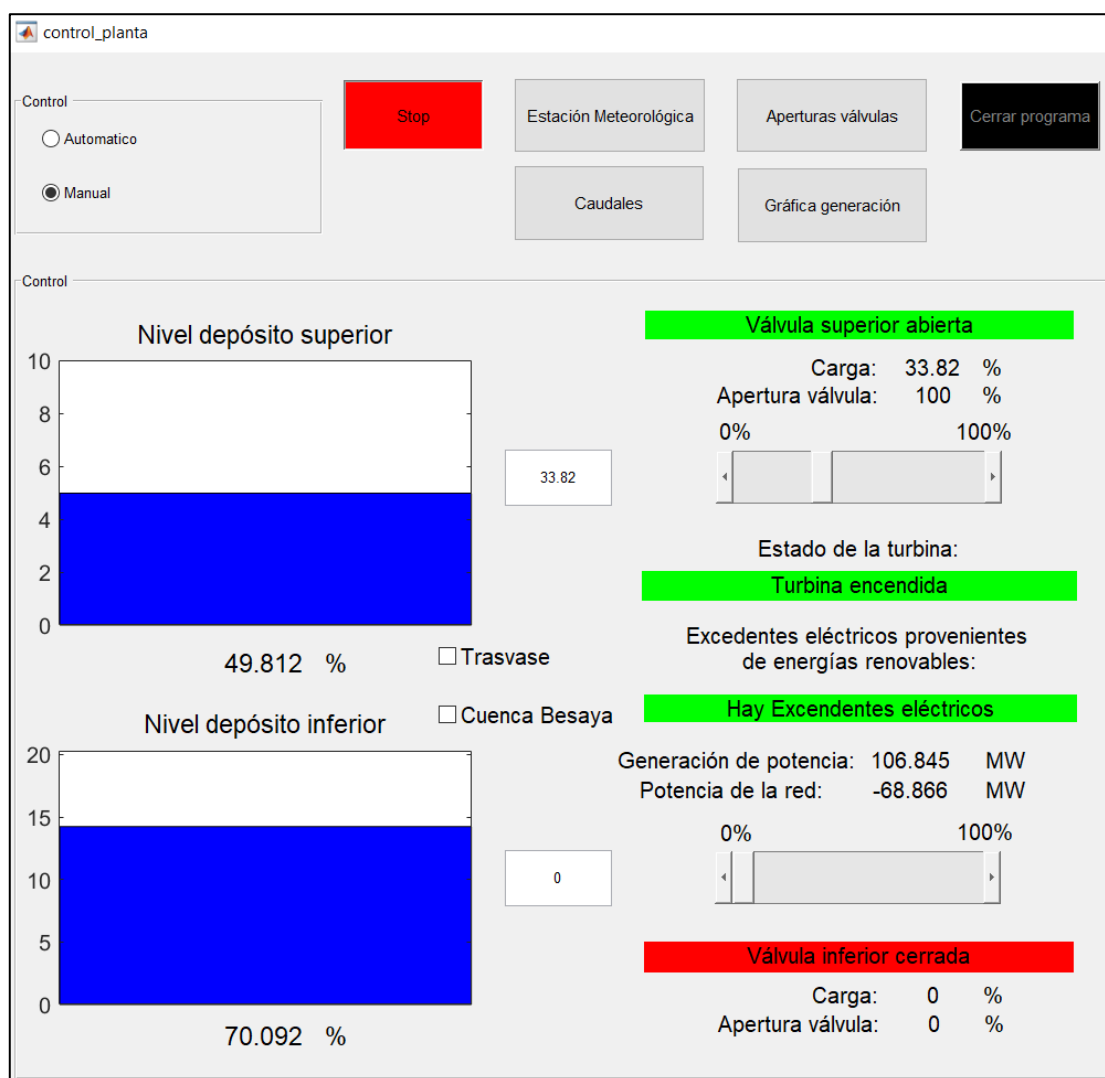
**Figura 7.12.** Pantalla de control en modo manual.

En este modo aparecen una serie de opciones nuevas (Figura 7.12); en la parte central de la pantalla, se muestran los dos tipos de desembalse de agua que tiene la central. En la parte central derecha, aparece la potencia de la red en tiempo real y tanto en la parte superior como inferior derecha y central, se muestran las barras deslizantes y cajas de cada una de las válvulas.



El caudal que se desee turbinar o bombear se introducirá de forma manual (Figura 7.13). Para ello, se han habilitado dos mecanismos; el primero consiste en una barra deslizante donde arrastrando con el ratón se permitirá suministrar a la turbina la carga deseada. El valor al que equivale, el lugar donde se coloque la barra central, será mostrado en la carga y caja de la válvula correspondiente.

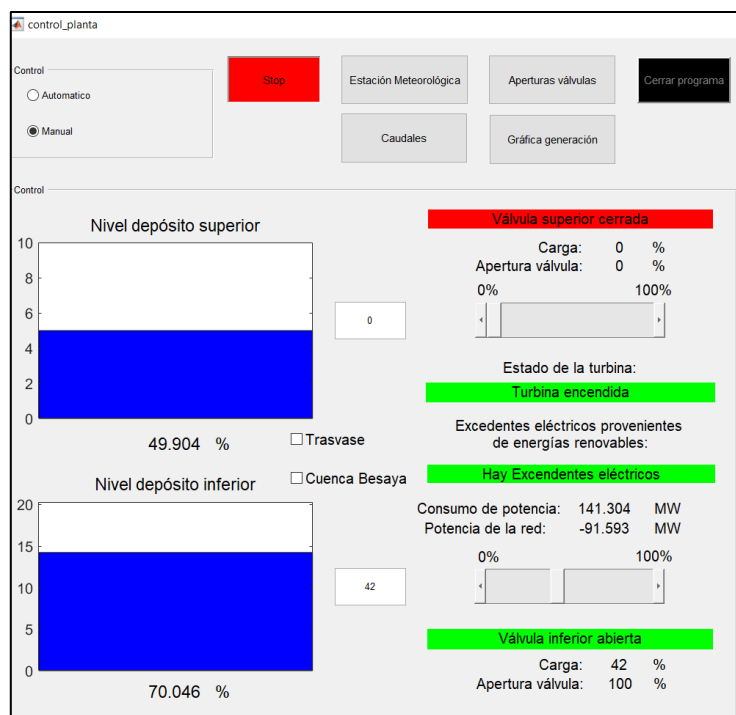
Utilizando las flechas de la derecha e izquierda de la barra deslizante, se aumentará o disminuirá la carga en un 10%, respectivamente.



**Figura 7.13.** Utilización de la barra deslizante superior.

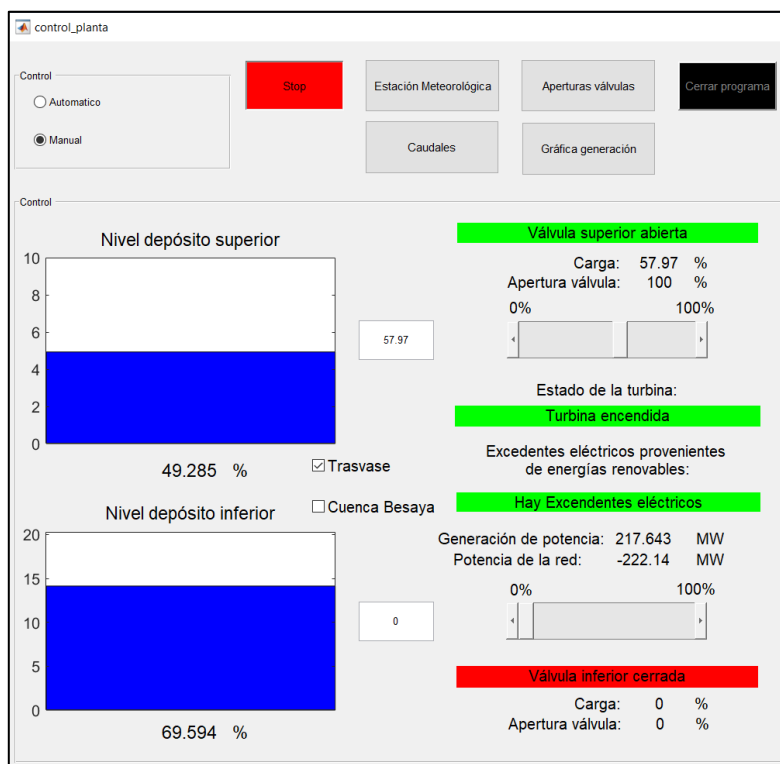
Como solo se permite tener una de las dos válvulas abiertas, si una de las dos válvulas está abierta y se desea abrir la otra válvula, esta no se abrirá hasta que la anterior no se haya cerrado completamente.

Si se desea una carga con un porcentaje de actuación muy concreto, es recomendable utilizar la caja en lugar de la barra deslizante. Para utilizar esta caja, tan solo hay que introducir el número en porcentaje de la carga que se quiere introducir y pulsar la tecla intro (Figura 7.14).



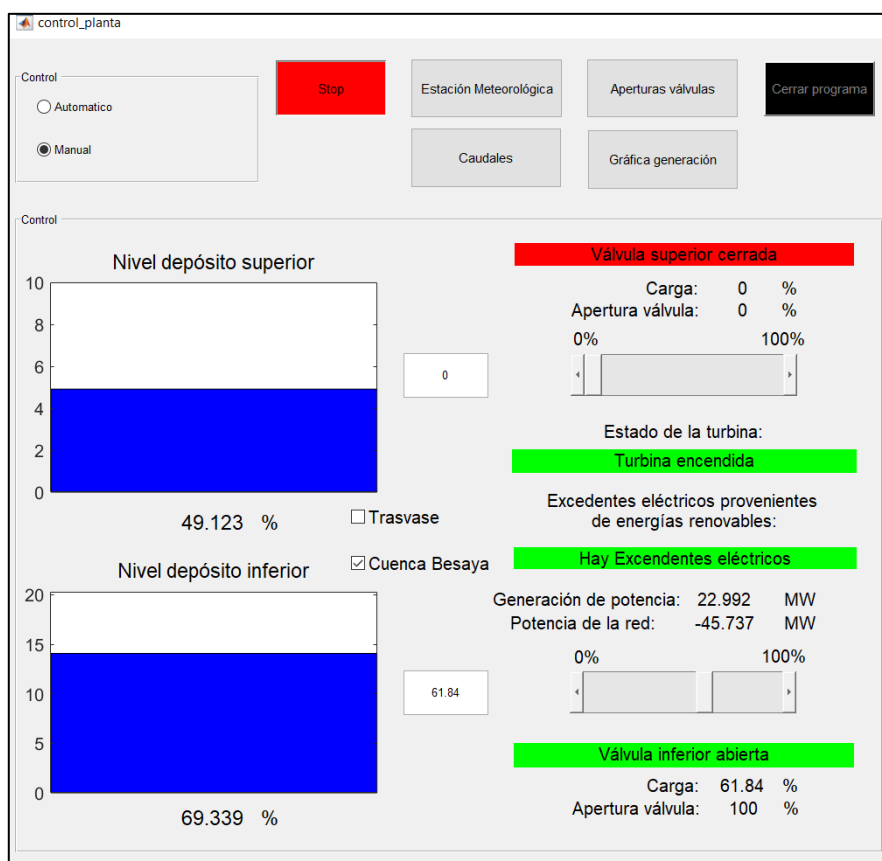
**Figura 7.14.** Apertura de la válvula inferior mediante la caja.

Si se desea realizar un trasvase, el desembalse de agua se podrá realizar desde ambos depósitos, introduciendo la carga deseada en la válvula correspondiente y pinchando sobre la opción “trasvase” (Figura 7.15). De esta manera, el agua del sistema dejará de funcionar en circuito cerrado.



**Figura 7.15.** Central funcionando con la opción trasvase activada.

De la misma manera, si se desea desembalsar agua a través de la cuenca del Besaya (Figura 7.16), pinchando sobre este nombre e introduciendo la carga que se quiere desembalsar, comenzará el desembalse.

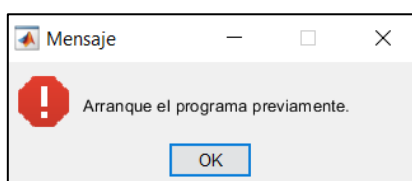


**Figura 7.16.** Desembalse hacia la cuenca del Besaya.

## 7.4 Desplegables.

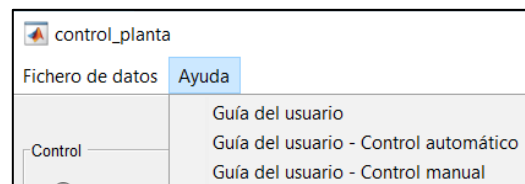
En todo momento, se podrá comprobar el histórico de apertura de las válvulas, nivel de los depósitos y carga, para cada fecha y hora en el fichero de salida "Apertura\_valvula.txt". Este fichero se podrá examinar mientras el programa está en funcionamiento desde la pestaña 'Fichero de datos'.

Este fichero solo podrá observarse con el programa arrancado, en caso de que el programa no esté en funcionamiento, aparecerá por pantalla el error de la figura 7.17.



**Figura 7.17.** Error de programa no arrancado.

Por último, dentro del propio programa, el usuario dispondrá de una ayuda (véase la figura 7.18), que mostrará un archivo “.txt” con la información necesaria para el correcto uso del programa.



**Figura 7.18.** Pestañas del fichero de escritura y ayuda.

# Capítulo 8:

# **CONCLUSIONES**

## 8 Conclusiones.

En este proyecto se ha realizado la visión más convencional del funcionamiento de las centrales hidroeléctricas de bombeo y las cantidades de agua necesarias para la obtención de energía teniendo en cuenta el consumo y precios de la electricidad en España.

Se ha conseguido realizar un programa con dos modos de funcionamiento; uno automático y otro manual que permite al usuario interactuar con el programa para realiza maniobras. El sistema es capaz de conocer el estado de la turbina, el estado de la red, la potencia que se genera y se consume en cada momento. Todo ello, regulando el caudal para satisfacer la demanda, asumiendo las restricciones en los caudales.

Por último, se han habilitado unos paneles que permiten controlar el nivel de ambos depósitos en tiempo real e informa al usuario de la situación meteorológica que rodea a la central.

Se ha incidido en la viabilidad de estas centrales como forma de obtener y almacenar energía de una forma renovable y amortiguar las variaciones en el precio de la electricidad durante el ciclo diario. Para ello se han simulado unos consumos energéticos desde una perspectiva local.

Todo ello implementado mediante una interfaz gráfica con interacción con el usuario utilizando como plataforma Matlab.

# Capítulo 9:

# **BIBLIOGRAFÍA**

## 9 Bibliografía.

[1] Guía técnica de la clasificación de presas en función del riesgo potencial. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección de Obras Hidráulicas y Calidad de las aguas (2 de marzo de 2020). Recuperado de

[https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/clasificacion\\_presas\\_tcm30-216049.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/clasificacion_presas_tcm30-216049.pdf)

[2] Clasificación de presas en función del riesgo potencial – Miteco (5 de marzo de 2020). Recuperado de

<https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/seguridad-de-presas-y-embalses/gestion-seguridad-presas/clasificacion.aspx>

[3] Tipos de presas II: presas de materiales sueltos (5 de marzo de 2020). Recuperado de

<https://blog.structuralia.com/tipologia-de-presas-ii-presas-de-materiales-sueltos>

[4] Tipos de presas y embalses. WIKIPRESAS.ORG (12 de marzo de 2020). Recuperado de

<https://www.wikipresas.org/tipos-de-presas-y-embalses/>

[5] Turbinas hidráulicas. CEUPE (15 de marzo de 2020). Recuperado de

<https://www.ceupe.com/blog/turbinas-hidraulicas.html>

[6] Oriol Planas (2018). Turbinas hidráulicas | Energía hidráulica - Energía solar (16 de marzo de 2020). Recuperado de

<https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-hidraulica/turbinas-hidraulicas>

[7] Matlab. <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

[8] Centrales hidroeléctricas de bombeo. Hidroproyectos (18 de marzo de 2020). Recuperado de

<http://www.hidroproyectos.com/n.php?n=CENTRALES-HIDROELECTRICAS-DE-BOMBEO>

[9] Fernández Diego, I., Ramón Robles Díaz, A. (2011). Centrales de Generación de Energía Eléctrica. Unidad didáctica 3. Recuperado de

<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1160/course/section/1407/bloque-energia-III.pdf>

[10] Electra de Viesgo, S.A. (1990). Salto de Aguayo.

[11] González Morcillo, C. (2011). Lógica Difusa. Recuperado de

[https://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011\\_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf](https://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf)

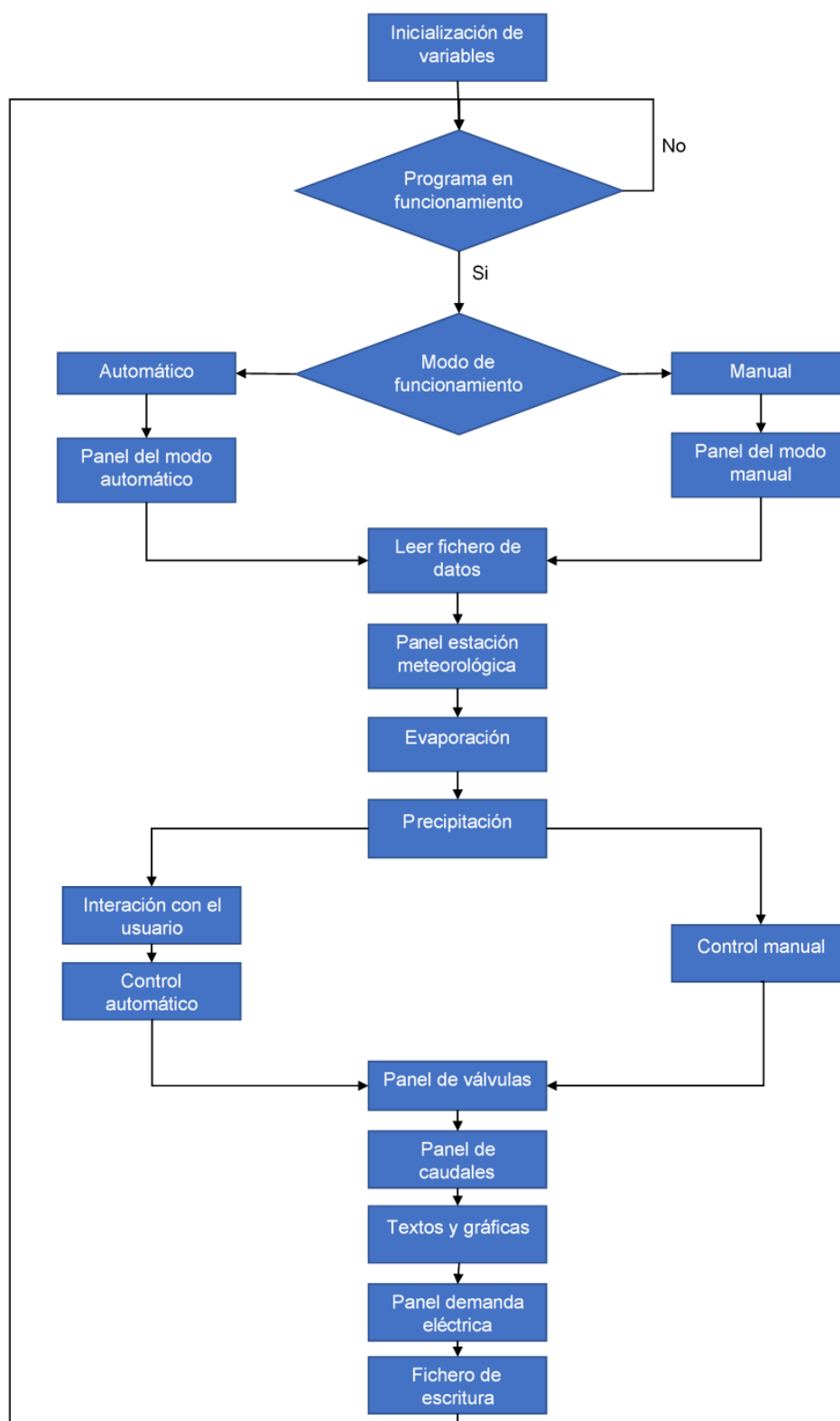


- [12] Red Eléctrica de España. Nuestros hábitos de consumo (19 de abril de 2020).  
<https://www.ree.es/es/red21/eficiencia-energetica-y-consumo-inteligente/nuestros-habitos-de-consumo>
- [13] Luis Orille Fernández, A. Centrales Eléctricas I. (1996).
- [14] Tema 3 Evaporación (22 de abril de 2020). Recuperado de <http://webdelprofesor.ula.ve/>
- [15] (9 de Julio de 2019). Santander se abastecerá de emergencia del embalse de Alsa mientras se tramita el trasvase del Ebro. *Europapress*.
- [16] Ramos, A.I. (febrero, 2011). Garantizar el abastecimiento de agua a Cantabria y mantener el nivel ecológico óptimo de nuestros ríos, objetivos de la obra del bitrasvase del Ebro. Trabajo presentado en el *VII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua "Ríos Ibéricos +10. Mirando al futuro tras 10 años de DMA*.
- [17] Dirección General de Protección Civil y Emergencias (29 de abril de 2020). Recuperado de  
<http://www.proteccioncivil.es/autoproteccion/presentacion>
- [18] Fundación para la eficiencia energética y el medioambiente (22 de mayo de 2020). Recuperado de  
<http://www.f2e.es/es/las-energias-renovables-suponen-casi-el-39-de-la-generacion-electrica-nacional>
- [19] Historia de la electricidad en España (25 de mayo de 2020). Recuperado de  
<http://www.energiaysociedad.es/manenergia/1-2-historia-de-la-electricidad-en-espana/>

# Capítulo 10: **ANEJO DE PROGRAMACIÓN**

## 10 Anejo de programación.

En este capítulo, se muestra todo el código que conforma el programa y un diagrama de flujo que representa a grandes rasgos la estructura del proceso



## 10.1 Inicialización.

```
function varargout = control_planta(varargin)
% PLANTA MATLAB code for Planta.fig
%     PLANTA, by itself, creates a new PLANTA or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = PLANTA returns the handle to a new PLANTA or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     PLANTA('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in PLANTA.M with the given input arguments.
%
%     PLANTA('Property','Value',...) creates a new PLANTA or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%     applied to the GUI before Planta_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property application
%     stop. All inputs are passed to Planta_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Planta

% Last Modified by GUIDE v2.5 04-Jun-2020 19:36:08

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @control_planta_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @control_planta_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Planta is made visible.

function control_planta_OpeningFcn(hObject,~, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin command line arguments to Planta (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Planta
handles.output = hObject;

%INICIALIZACIÓN DE VARIABLES.

%Cerrar ficheros.
fclose('all');
%Función tiempoalsareal
handles.diasllovidos=zeros(1,30);
%Caudal Torina.
handles.Torina=1.65*1*10^-6;
%Caudales.
handles.m3regenerados=0;
handles.m3regenerados15min=0;
handles.m3consumidos=0;
handles.m3consumidos15min=0;
handles.m3trasvase=0;
handles.m3trasvase15min=0;
%Tiempo de muestreo.
handles.Ts=1;
%Panel portada.
set(handles.uipanel10, 'visible', 'on');
%Rendimiento turbina.
handles.rendimiento=0;
%Potencia.
handles.mvativos=0;
%Vector para representar la potencia.
handles.vectormvativos=0;
handles.vdemandaelectricas=0;
handles.vlinea=0;
%Borrar fichero de escritura.
delete('Apertura_valvulas.txt');
%Contador fichero lectura.
handles.n=1;
%Nivel Depositos.
handles.depositosup=50;
handles.depositoinf=70;
%Carga.
handles.aperturavalvulasup=0;
handles.aperturavalvulainf=0;
%Válvulas.
handles.aperturavalvulasup1=0;
handles.aperturavalvulainf1=0;
%Botón start/stop.
handles.estado=0; %Estado 0 = stop.
%Mensaje error fichero de datos.
handles.encendido=0;
%Inicializar imagen de fondo.
axes(handles.axes35);
at=imread('fondo.jpg');

```

```

imshow(at);
axis off;
%Interacción usuario.
handles.trasvase=0; %Trasvase.
handles.besaya=0; %Desembalse.
%Gráficas pestaña apertura válvulas.
set(handles.uipanel7,'visible','off');
handles.vectoraperturavalvulasup=0;
handles.vectoraperturavalvulainf=0;
handles.vaperturavalvulasup1=0;
handles.vaperturavalvulainf1=0;
handles.vdepositosup=handles.depositosup;
handles.vdepositoinf=handles.depositoinf;
%Panel meteorología.
set(handles.togglebutton3,'visible','off');
set(handles.uipanel4,'visible','off');
%Panel caudales.
set(handles.uipanel6,'visible','off');
set(handles.togglebutton4,'visible','off');
%Modo auto/manual.
set(handles.radiobutton1,'value',1);
set(handles.radiobutton5,'value',0);
%Color start verde.
set(handles.togglebutton2,'BackgroundColor','g');
%Escala depositos.
handles.x=[0 0 1 1];
%Inicialmente automático.
set(handles.togglebutton5,'visible','off');
set(handles.togglebutton7,'visible','off');
set(handles.slider10,'visible','off');
set(handles.slider11,'visible','off');
set(handles.text85,'visible','off');
set(handles.text87,'visible','off');
set(handles.text84,'visible','off');
set(handles.text86,'visible','off');
set(handles.checkbox2,'visible','off');
set(handles.checkbox3,'visible','off');
set(handles.edit2,'visible','off');
set(handles.edit3,'visible','off');
set(handles.uipanel12,'visible','off');
set(handles.uipanel18,'visible','off');
set(handles.text382,'visible','off');
set(handles.text383,'visible','off');
set(handles.text384,'visible','off');
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Planta wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = control_planta_OutputFcn(~, ~, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure

```

```

varargout{1} = handles.output;

%-----
% --- Executes when selected object is changed in uibuttongroup1.

function uibuttongroup1_SelectionChangedFcn(hObject, ~, handles)
% hObject    handle to the selected object in uibuttongroup1
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
handles.tipo=get(hObject,'String');
tipoa = handles radiobutton1.Value; %Boton tipo auto.
if tipoa == 1
    %MODO AUTOMÁTICO.
    set(handles.slider10,'visible','off');
    set(handles.slider11,'visible','off');
    set(handles.text85,'visible','off');
    set(handles.text87,'visible','off');
    set(handles.text84,'visible','off');
    set(handles.text86,'visible','off');
    set(handles.checkbox2,'visible','off');
    set(handles.checkbox3,'visible','off');
    set(handles.edit2,'visible','off');
    set(handles.edit3,'visible','off');
    set(handles.text382,'visible','off');
    set(handles.text383,'visible','off');
    set(handles.text384,'visible','off');
    %Ocultar gráficas controlador.

    if handles.togglebutton2.Value==1
        set(handles.togglebutton5,'visible','on');
        set(handles.togglebutton7,'visible','on');
    else
        set(handles.togglebutton5,'visible','off');
        set(handles.togglebutton7,'visible','off');
    end
end
else
    %MODO MANUAL.
    set(handles.checkbox2,'visible','on');
    set(handles.checkbox3,'visible','on');
    set(handles.slider10,'visible','on');
    set(handles.slider11,'visible','on');
    set(handles.text85,'visible','on');
    set(handles.text87,'visible','on');
    set(handles.text84,'visible','on');
    set(handles.text86,'visible','on');
    set(handles.checkbox2,'visible','on');
    set(handles.checkbox3,'visible','on');
    set(handles.edit2,'visible','on');
    set(handles.edit3,'visible','on');
    set(handles.text382,'visible','on');
    set(handles.text383,'visible','on');
    set(handles.text384,'visible','on');
    if handles.togglebutton2.Value==1
        set(handles.togglebutton5,'visible','on');
    else
        set(handles.togglebutton5,'visible','off');
    end
end

```

```

end

%-----
%Control sliders en manual.
%-----

function slider10_Callback(hObject, ~, handles)

    %Apertura válvula superior.
    handles.aperturavalvulasup=get(hObject,'value');
    handles.edit2.String = num2str(round(handles.aperturavalvulasup, 2));
    guidata(hObject,handles);

function slider10_CreateFcn(hObject, ~, ~)

    if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultuicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
    end

function slider11_Callback(hObject, ~, handles)

    %Apertura válvula inferior.
    handles.aperturavalvulainf=get(hObject,'value');
    handles.edit3.String = num2str(round(handles.aperturavalvulainf, 2));
    guidata(hObject,handles);

function slider11_CreateFcn(hObject, ~, ~)

    if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultuicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
    end

%-----

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(~, ~, ~)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

%BOTON CERRAR PROGRAMA.
close(gcf);

% --- Executes on button press in togglebutton2.
function togglebutton2_Callback(hObject, ~, handles)
% hObject    handle to togglebutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton2

%BOTON START/STOP.
    guidata(hObject,handles);
    %START.
if get(hObject,'Value')==1
    handles.pushbutton5.Enable = 'off';
    handles.encendido=1;
    set(handles.uipanel2,'visible','on');
    if handles.radiobutton1.Value == 1
        set(handles.togglebutton3,'visible','on');

```



```

        set(handles.togglebutton4, 'visible', 'on');
        set(handles.togglebutton7, 'visible', 'on');
        set(handles.togglebutton5, 'visible', 'on');

    else
        set(handles.togglebutton3, 'visible', 'on');
        set(handles.togglebutton4, 'visible', 'on');
        set(handles.togglebutton7, 'visible', 'on');
        set(handles.togglebutton5, 'visible', 'on');
    end
    hObject.String = 'Stop';
    set(handles.togglebutton2, 'BackgroundColor', 'r');
else
    %STOP.
    handles.pushbutton5.Enable = 'on';
    handles.encendido=0;
    set(handles.togglebutton3, 'visible', 'off');
    set(handles.togglebutton4, 'visible', 'off');
    set(handles.togglebutton5, 'visible', 'off');
    set(handles.togglebutton7, 'visible', 'off');

    hObject.String = 'Start';
    set(handles.togglebutton2, 'BackgroundColor', 'g');
end
while get(hObject, 'Value')==1
    if handles.radiobutton1.Value == 1      % Automatico
        [handles]=controlautomatico(handles);
    else % Manual
        [handles]=controlmanual(handles);
    end
    drawnow;
    guidata(hObject, handles);
    pause(handles.Ts);
end

% --- Executes on button press in togglebutton3.
function togglebutton3_Callback(hObject, ~, handles)
% hObject    handle to togglebutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject, 'Value') returns toggle state of togglebutton3

%PANEL ESTACIÓN METEOROLÓGICA.
if get(hObject, 'Value') == 1
    set(handles.uipanel4, 'visible', 'on');
else
    set(handles.uipanel4, 'visible', 'off');
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in togglebutton4.
function togglebutton4_Callback(hObject, ~, handles)
% hObject    handle to togglebutton4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject, 'Value') returns toggle state of togglebutton4

```

```

%PANEL CAUDALES.
if get(hObject,'value') == 1
    set(handles.uipanel6,'visible','on');
else
    set(handles.uipanel6,'visible','off');
end
guidata(hObject,handles);

function edit2_Callback(hObject, ~, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a double

%CAJA SUPERIOR MODO MANUAL APERTURA VALVULA.
if handles.aperturavalvulainf>0 && handles.aperturavalvulasup==0
    handles.aperturavalvulasup=0;
else
    handles.aperturavalvulasup = str2double(get(hObject,'String'));
    handles.slider10.value = handles.aperturavalvulasup;
end
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, ~, ~)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on windows.
%          See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultuicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, ~, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a double

%CAJA INFERIOR MODO MANUAL APERTURA VALVULA.
if handles.aperturavalvulasup>0
    handles.aperturavalvulainf=0;
else
    handles.aperturavalvulainf = str2double(get(hObject,'String'));
    handles.slider11.value = handles.aperturavalvulainf;
end
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, ~, ~)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on windows.
%       See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in checkbox2.
function checkbox2_Callback(hObject, ~, handles)
% hObject    handle to checkbox2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'value') returns toggle state of checkbox2

%CHECKBOX TRASVASE.
handles.trasvase=get(hObject,'value');
guidata(hObject,handles);

% --- Executes on button press in checkbox3.
function checkbox3_Callback(hObject, ~, handles)
% hObject    handle to checkbox3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'value') returns toggle state of checkbox3

%CHECKBOX CUENCA BESAYA.
handles.besaya=get(hObject,'value');
guidata(hObject,handles);

% --- Executes on button press in togglebutton5.
function togglebutton5_Callback(hObject, ~, handles)
% hObject    handle to togglebutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'value') returns toggle state of togglebutton5

%PANEL GRÁFICAS.
if get(hObject,'value') == 1
    set(handles.uipanel7,'visible','on');
else
    set(handles.uipanel7,'visible','off');
end
guidata(hObject,handles);

% --- Executes on button press in togglebutton7.
function togglebutton7_Callback(hObject, ~, handles)
% hObject    handle to togglebutton7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'value') returns toggle state of togglebutton7

%PANEL GRÁFICA GENERACIÓN/CONSUMO.
if get(hObject,'value') == 1
    set(handles.uipanel8,'visible','on');
else
    set(handles.uipanel8,'visible','off');
end

```

```

guidata(hObject,handles);

% PESTAÑAS DE AYUDA AL USUARIO Y FICHEROS.
% -----
function Fichero_escritura_Callback(~, ~, handles)
% hObject    handle to Fichero_escritura (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
if handles.encendido==0
    errordlg('Arranque el programa previamente.','Mensaje');
else
    winopen('Apertura_valvulas.txt');
end

% -----
function Untitled_1_Callback(~, ~, ~)
% hObject    handle to Untitled_1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% -----
function guiacompleta_Callback(~, ~, ~)
% hObject    handle to guiacompleta (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
winopen('guia_usuario.txt');

% -----
function guiaautomatico_Callback(~, ~, ~)
% hObject    handle to guiaautomatico (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
winopen('guia_usuario_automatico.txt');

% -----
function guiamanual_Callback(~, ~, ~)
% hObject    handle to guiamanual (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
winopen('guia_usuario_manual.txt');

% --- Executes on button press in togglebutton8.
function togglebutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to togglebutton8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton8

%PANEL DE PORTADA.
if get(hObject,'Value') == 1
    set(handles.uipanel10,'visible','off');
end
guidata(hObject,handles);

```

## 10.2 Modo automático.

```
function [handles]=controlautomatico(handles)
```

```
%-----
```

```
%En control automático no hay trasvase.
```

```
handles.trasvase=0;
```

```
handles.besaya=0;
```

```
%-----
```

```
% 1. Leer fichero de datos.
```

```
%-----
```

```
[handles]=tiempoalsareal(handles);
```

```
%-----
```

```
% 2. Estación meteorológica.
```

```
%-----
```

```
[handles]=tiempomediajo(handles);
```

```
%-----
```

```
% 3. Evaporación.
```

```
%-----
```

```
[handles]=evaporacionguillen(handles);
```

```
%-----
```

```
% 4. Precipitación.
```

```
%-----
```

```
[handles]=programaprecipitacion(handles);
```

```
%-----
```

```
% 5. Actualización valores depósitos.
```

```
%-----
```

```
[handles]=limites_depositos(handles);
```

```
%-----
```

```
% 6. Control aperturas de salida automático.
```

```
%-----
```

```
[handles]=controlauto(handles);
```

```
%-----
```

```
% 7. Límites caudales.
```

```
%-----
```

```
[handles]=limite_caudal(handles);
```

```
%-----
```

```
% 8. Gráficas válvulas.
```

```
%-----
```

```
[handles]=graficasvalvulas(handles);
```

```
%-----
```

```

% 9. Caudales.
%-----
[handles]=caudales(handles);
%-----

% 10. Mostrar textos y gráficas.
%-----
[handles]=textosygraficasautomatico(handles);
%-----

% 11. Mostrar demanda.
%-----
[handles]=graficasdemanda(handles);
%-----

% 12. Escribir en fichero.
%-----
[handles]=exportarfichero(handles);
%-----

```

### 10.2.1 Control automático.

```

function [handles]=controlauto(handles)

%-----
%Caudales de salida parte matematica control automático.
%-----
% 29-33m3/s en generación. ---> 31m3/s en generación.
% 21-28m3/s en bombeo. ---> 24.5m3/s en bombeo.
% 1hm3 =1*10^6 m3.

% DEPOSITOS VACIOS O NI EXCEDENTES NI DEMANDA.
if (handles.depositoinf==0 && handles.depositosup==0) || (handles.demandaelectrica==0)
    %válvulas cerradas y caudales a 0.
    handles.aperturavalvulasup=0;
    handles.aperturavalvulainf=0;
    handles.aperturavalvulasup1=0;
    handles.aperturavalvulainf1=0;
    handles.m3regenerados=0;
    handles.m3regenerados15min=0;
    handles.m3consumidos=0;
    handles.m3consumidos15min=0;
    handles.mvatios=0;
    handles.rendimiento=0;

    %EXCEDENTES -> SE BOMBEA

```

```
elseif (handles.demandaelectrica<0 && handles.depositoinf>0 && handles.depositosup<100) % Relleno gasto MW.
```

```
%Obtención de las cotas de cada uno de los depósitos.
```

```
niveldepositosuperior=handles.depositosuphm3;
```

```
fis = readfis('megavatioup.fis');
```

```
alturasup=evalfis(fis,niveldepositosuperior);
```

```
niveldepositoinferior=handles.depositoinfhm3;
```

```
fis = readfis('megavatiowinf.fis');
```

```
alturainf=evalfis(fis,niveldepositoinferior);
```

```
handles.altura=(alturasup-alturainf)+4.564; %Altura y perdidas de carga.
```

```
%Se calcula el caudal sin rendimiento.
```

```
handles.m3regenerados=(-handles.demandaelectrica*1*10^6)/(1000*9.81*handles.altura*4);
```

```
if handles.m3regenerados>24.5
```

```
    handles.m3regenerados=24.5;
```

```
end
```

```
%Rendimiento de la turbina para ese caudal.
```

```
fis = readfis('rendimiento.fis');
```

```
handles.rendimiento=evalfis(fis,(handles.m3regenerados*100)/24.5);
```

```
handles.rendimiento=handles.rendimiento/100;
```

```
%Caudal con rendimiento.
```

```
handles.m3regenerados=(-handles.demandaelectrica*1*10^6*handles.rendimiento)/(1000*9.81*handles.altura*4);
```

```
%En bomba el caudal máximo son 24.5 m3/s.
```

```
if handles.m3regenerados>24.5
```

```
    handles.m3regenerados=24.5;
```

```
end
```

```
handles.m3regenerados15min=handles.m3regenerados*15*60; %*15*60 para 15min -> m3/15min
```

```
%Apertura de la valvula para obtener el caudal necesario.
```

```
handles.aperturavalvulainf=(handles.m3regenerados/24.5)*100;
```

```
%Límite apertura válvula.
```

```
if handles.aperturavalvulainf>100
```

```
    handles.aperturavalvulainf=100;
```

```
%Si la apertura es menor del 35%, no hay movimiento de caudal.
```

```
elseif handles.aperturavalvulainf<35
```

```
    handles.aperturavalvulainf=0;
```

```
    handles.m3regenerados15min=0;
```

```
    handles.m3regenerados=0;
```

```
end
```

```
%Nuevos valores depósitos.
```

```
handles.depositoinfhm3=handles.depositoinfhm3-(handles.m3regenerados15min*1*10^-6);
```

```
if handles.depositoinfhm3<0
```

```
    handles.depositoinfhm3=0;
```

```
end
```

```
handles.depositoinf=(handles.depositoinfhm3/20.3)*100;
```

```
handles.depositosuphm3=handles.depositosuphm3+(handles.m3regenerados15min*1*10^-6);
```

```
if handles.depositosuphm3>100
```

```
    handles.depositosuphm3=100;
```

```
end
```

```
handles.depositosup=(handles.depositosuphm3/10)*100;
```

```

%Potencia generada.
handles.mvativos=((1000*handles.m3regenerados*9.81*handles.altura*4)/1*10^6)*(1+(1-handles.rendimiento)); %se
muestra lo que se consume.
%Potencia máxima turbinas.
if handles.mvativos>339.2
    handles.mvativos=339.2;
end
%Para función caudales.
handles.aperturavalvulasup=0;
handles.m3consumidos=0;
handles.m3consumidos15min=0;
handles.aperturavalvulasup1=0;
handles.aperturavalvulainf1=100;

%DEMANDA -> SE TURBINA
elseif (handles.demandaelectrica>0 && handles.depositoinf<100 && handles.depositosup>0)

    %Obtención de las cotas de cada uno de los depósitos.
    niveldepositosuperior=handles.depositosuphm3;
    fis = readfis('megavativosup.fis');
    alturasup=evalfis(fis,niveldepositosuperior);
    niveldepositoinferior=handles.depositoinfhm3;
    fis = readfis('megavativosinf.fis');
    alturainf=evalfis(fis,niveldepositoinferior);
    handles.altura=(alturasup-alturainf)-4.564;%Altura y perdidas de carga.

    %Se calcula el caudal sin rendimiento.
    handles.m3consumidos=(handles.demandaelectrica*1*10^6)/(1000*9.81*handles.altura*4);
    if handles.m3consumidos>31
        handles.m3consumidos=31;
    end

    %Rendimiento de la turbina para ese caudal.
    fis = readfis('rendimiento.fis');
    handles.rendimiento=evalfis(fis,(handles.m3consumidos*100)/31);
    handles.rendimiento=handles.rendimiento/100;
    %Caudal con rendimiento.
    handles.m3consumidos=(handles.demandaelectrica*1*10^6*handles.rendimiento)/(1000*9.81*handles.altura*4);

    %Caudal máximo 31m3/s.
    if handles.m3consumidos>31
        handles.m3consumidos=31;
    end

    handles.m3consumidos15min=handles.m3consumidos*15*60; %*15*60 para 15min -> m3/15min
    %Apertura de la valvula para obtener el caudal necesario.
    handles.aperturavalvulasup=(handles.m3consumidos/31)*100;
    %Límite apertura válvula.
    if handles.aperturavalvulasup>100
        handles.aperturavalvulasup=100;
    end

```



```

%Si la apertura es menor del 35%, no hay movimiento de caudal.
elseif handles.aperturavalvulasup<35
    handles.aperturavalvulasup=0;
    handles.m3consumidos=0;
    handles.m3consumidos15min=0;
end
%Nuevos valores depositos.
handles.depositoinfhm3=handles.depositoinfhm3+(handles.m3consumidos15min*1*10^-6);
if handles.depositoinfhm3>100
    handles.depositoinfhm3=100;
end
handles.depositoinf=(handles.depositoinfhm3/20.3)*100;
handles.depositosuphm3=handles.depositosuphm3-(handles.m3consumidos15min*1*10^-6);
if handles.depositosuphm3<0
    handles.depositosuphm3=0;
end
handles.depositosup=(handles.depositosuphm3/10)*100;
%Potencia generada.
handles.mvativos=((1000*handles.m3consumidos*9.81*handles.altura*4)/1*10^6)*handles.rendimiento; %Se muestra lo que
se genera.
%Potencia máxima.
if handles.mvativos>339
    handles.mvativos=339;
end
%Para función caudales.
handles.aperturavalvulainf=0;
handles.m3regenerados=0;
handles.m3regenerados15min=0;
handles.aperturavalvulasup1=100;
handles.aperturavalvulainf1=0;
else
    handles.m3consumidos=0;
    handles.m3consumidos15min=0;
    handles.m3regenerados=0;
    handles.m3regenerados15min=0;
    handles.aperturavalvulasup=0;
    handles.aperturavalvulainf=0;
    handles.mvativos=0;
    handles.rendimiento=0;
    handles.aperturavalvulasup1=0;
    handles.aperturavalvulainf1=0;
end
end

```

### 10.3 Modo manual.

```
function [handles]=controlmanual(handles)
```

```
%-----  
  
%Control manual.  
%-----  
  
% 1. Leer fichero.  
%-----  
[handles]=tiempoalsareal(handles);  
%-----  
  
% 2. Estación meteorológica.  
%-----  
[handles]=tiempomediajo(handles);  
%-----  
  
% 3. Evaporación.  
%-----  
[handles]=evaporacionguillen(handles);  
%-----  
  
% 4. Precipitación.  
%-----  
[handles]=programaprecipitacion(handles);  
%-----  
  
% 5. Actualizar valores depositos.  
%-----  
[handles]=limites_depositos(handles);  
%-----  
  
% 6. Recoger valores del usuario.  
%-----  
[handles]=informacionusuario_manual(handles);  
%-----  
  
% 9. Caudales de salida.  
%-----  
[handles]=controlmanu(handles);  
%-----  
  
% 8. Gráficas.  
%-----  
[handles]=graficasvalvulas(handles);  
%-----  
  
% 10. Caudales.  
%-----  
[handles]=caudales(handles);  
%-----
```

```

% 11. Textos y gráficas.
%-----
[handles]=textosygraficasmanual(handles);
%-----

% 12. Mostrar generación/demanda.
%-----
[handles]=graficasdemanda(handles);
%-----

% 13. Escribir en fichero.
%-----
[handles]=exportarfichero(handles);
%-----

```

### 10.3.1 Control Manual.

```

function [handles]=controlmanu(handles)

%-----
%Caudales de salida parte matematica control manual.
%-----
% 29-33m3/s en generación. ---> 31m3/s en generación.
% 21-28m3/s en bombeo. ---> 24.5m3/s en bombeo.
% 1hm3 =1*10^6 m3.

% VÁLVULAS CERRADAS.
if (handles.aperturavalvulasup==0 && handles.aperturavalvulainf==0)

    handles.m3consumidos=0;
    handles.m3consumidos15min=0;
    handles.m3regenerados=0;
    handles.m3regenerados15min=0;
    handles.m3trasvase=0;
    handles.m3trasvase15min=0;
    handles.aperturavalvulasup=0;
    handles.aperturavalvulainf=0;
    handles.aperturavalvulasup1=0;
    handles.aperturavalvulainf1=0;
    handles.mvatios=0;
    handles.rendimiento=0;

%TURBINA.
elseif (handles.aperturavalvulasup>0 && handles.depositosup>0 && handles.depositoinf<100 && handles.trasvase==0 &&
handles.besaya==0)

```

```

%Caudal.
handles.m3consumidos=(handles.aperturavalvulasup/100)*31;
handles.m3consumidos15min=handles.m3consumidos*15*60;
%Rendimiento de la turbina para ese caudal.
fis = readfis('rendimiento.fis');
handles.rendimiento=evalfis(fis,(handles.m3consumidos*100)/31);
handles.rendimiento=handles.rendimiento/100;
%Obtención de las cotas de cada uno de los depositos.
niveldepositosuperior=handles.depositosuphm3;
fis = readfis('megavatioup.fis');
alturasup=evalfis(fis,niveldepositosuperior);
niveldepositoinferior=handles.depositoinfhm3;
fis = readfis('megavatioup.fis');
alturainf=evalfis(fis,niveldepositoinferior);
handles.altura=(alturasup-alturainf)-4.564; %Altura y perdidas de carga.
%Nuevos niveles de los depositos.
handles.depositoinfhm3=handles.depositoinfhm3+(handles.m3consumidos15min*1*10^-6);
if handles.depositoinfhm3>100
    handles.depositoinfhm3=100;
end
handles.depositoinf=(handles.depositoinfhm3/20.3)*100;
handles.depositosuphm3=handles.depositosuphm3-(handles.m3consumidos15min*1*10^-6);
if handles.depositosuphm3<0
    handles.depositosuphm3=0;
end
handles.depositosup=(handles.depositosuphm3/10)*100;
%Potencia.
handles.mvatioup=((1000*handles.m3consumidos*9.81*handles.altura)*handles.rendimiento*4)/(1*10^6); % watioup=
1000*Q*g*h (W)
%Potencia instalada.
if handles.mvatioup>339
    handles.mvatioup=339;
end
%Para función caudales.
handles.m3regenerados=0;
handles.m3regenerados15min=0;
handles.aperturavalvulainf=0;
handles.m3trasvase=0;
handles.m3trasvase15min=0;
handles.aperturavalvulasup1=100;
handles.aperturavalvulainf1=0;

% BOMBEO
elseif (handles.aperturavalvulainf>0 && handles.depositoinf>0 && handles.depositosup<100 && handles.trasvase==0 &&
handles.besaya==0)

%Caudal.
handles.m3regenerados=(handles.aperturavalvulainf/100)*24.5;
handles.m3regenerados15min=handles.m3regenerados*15*60;

```

```

%Rendimiento de la turbina para ese caudal.
fis = readfis('rendimiento.fis');
handles.rendimiento=evalfis(fis,(handles.m3regenerados*100)/24.5);
handles.rendimiento=handles.rendimiento/100;
%Obtención de las cotas de cada uno de los depositos.
niveldepositosuperior=handles.depositosuphm3;
fis = readfis('megavatioup.fis');
alturasup=evalfis(fis,niveldepositosuperior);
niveldepositoinferior=handles.depositoinfhm3;
fis = readfis('megavatioup.fis');
alturainf=evalfis(fis,niveldepositoinferior);
handles.altura=(alturasup-alturainf)+4.564; %Altura y perdidas de carga.
%Nuevos niveles de los depositos.
handles.depositoinfhm3=handles.depositoinfhm3-(handles.m3regenerados15min*1*10^-6);
if handles.depositoinfhm3<0
    handles.depositoinfhm3=0;
end
handles.depositoinf=(handles.depositoinfhm3/20.3)*100;
handles.depositosuphm3=handles.depositosuphm3+(handles.m3regenerados15min*1*10^-6);
if handles.depositosuphm3>100
    handles.depositosuphm3=100;
end
handles.depositosup=(handles.depositosuphm3/10)*100;
%Potencia.
handles.mvatioup=(1000*handles.m3regenerados*9.81*handles.altura*4*(1+(1-handles.rendimiento)))/(1*10^6); %*0.9;
%muestro lo que consumo
%Potencia instalada.
if handles.mvatioup>339.2
    handles.mvatioup=339.2;
end
%Para función caudales.
handles.m3consumidos=0;
handles.m3consumidos15min=0;
handles.aperturavalvulasup=0;
handles.m3trasvase=0;
handles.m3trasvase15min=0;
handles.aperturavalvulasup1=0;
handles.aperturavalvulainf1=100;

% TRASVASE INFERIOR.
elseif (handles.aperturavalvulainf>0 && handles.depositoinf>0 && handles.aperturavalvulasup==0 && handles.trasvase==1) ||
(handles.aperturavalvulainf>0 && handles.depositoinf>0 && handles.aperturavalvulasup==0 && handles.besaya==1)

%Caudal.
handles.m3trasvase=(handles.aperturavalvulainf/100)*31;
handles.m3trasvase15min=handles.m3trasvase*15*60;
%Rendimiento de la turbina para ese caudal.
fis = readfis('rendimiento.fis');
handles.rendimiento=evalfis(fis,(handles.m3trasvase*100)/31);

```

```

handles.rendimiento=handles.rendimiento/100;
%Obtención de la cota del deposito.
niveldepositoinferior=handles.depositoinfhm3;
fis = readfis('megavatiainf.fis');
alturainf=evalfis(fis,niveldepositoinferior);
handles.altura=alturainf-797.5;
%Nuevos niveles de los depositos.
handles.depositoinfhm3=handles.depositoinfhm3-(handles.m3trasvase15min*1*10^-6);
if handles.depositoinfhm3<0
    handles.depositoinfhm3=0;
end
handles.depositoinf=(handles.depositoinfhm3/20.3)*100;
%Potencia.
handles.mvati=(1000*handles.m3trasvase*9.81*handles.altura*4*handles.rendimiento)/(1*10^6); %*0.9; %muestro lo que
consumo
%Potencia instalada.
if handles.mvati>339
    handles.mvati=339;
end
%Para función caudales.
handles.m3consumidos=0;
handles.m3consumidos15min=0;
handles.m3regenerados=0;
handles.m3regenerados15min=0;
handles.aperturavalvulasup=0;
handles.aperturavalvulasup1=0;
handles.aperturavalvulainf1=100;

%TRASVASE SUPERIOR.
elseif (handles.aperturavalvulasup>0 && handles.depositosup>0 && handles.depositoinf<100 && handles.trasvase==1) ||
(handles.aperturavalvulasup>0 && handles.depositosup>0 && handles.depositoinf<100 && handles.besaya==1)

%Caudal.
handles.m3consumidos=(handles.aperturavalvulasup/100)*31;
handles.m3consumidos15min=handles.m3consumidos*15*60;
%Rendimiento de la turbina para ese caudal.
fis = readfis('rendimiento.fis');
handles.rendimiento=evalfis(fis,(handles.m3consumidos*100)/31);
handles.rendimiento=handles.rendimiento/100;
%Obtención de la cota del deposito.
niveldepositosuperior=handles.depositosuphm3;
fis = readfis('megavatioup.fis');
alturasup=evalfis(fis,niveldepositosuperior);
handles.altura=(alturasup-797.5)-4.564; %Altura y perdidas de carga.
%Nuevos niveles de los depositos.
handles.depositosuphm3=handles.depositosuphm3-(handles.m3consumidos15min*1*10^-6);
if handles.depositosuphm3<0
    handles.depositosuphm3=0;
end

```

```

handles.depositosup=(handles.depositosupm3/10)*100;
%Potencia.
handles.mvativos=((1000*handles.m3consumidos*9.81*handles.altura)*handles.rendimiento*4)/(1*10^6); % wativos=
1000*Q*g*h (W)
%Potencia instalada.
if handles.mvativos>339
    handles.mvativos=339;
end
%Para función caudales.
handles.m3regenerados=0;
handles.m3regenerados15min=0;
handles.aperturavalvulainf=0;
handles.m3trasvase=0;
handles.m3trasvase15min=0;
handles.aperturavalvulasup1=100;
handles.aperturavalvulainf1=0;
else
    handles.m3consumidos=0;
    handles.m3consumidos15min=0;
    handles.m3regenerados=0;
    handles.m3regenerados15min=0;
    handles.m3trasvase=0;
    handles.m3trasvase15min=0;
    handles.aperturavalvulasup=0;
    handles.aperturavalvulainf=0;
    handles.mvativos=0;
    handles.rendimiento=0;
    handles.aperturavalvulasup1=0;
    handles.aperturavalvulainf1=0;
end

```

## 10.4 Funciones complementarias.

### 10.4.1 Lectura del fichero de Aguayo.

```

function [handles]=tiempoalsareal(handles)

%Abrir fichero de datos de la estación.
fid=fopen('alsanatural_final.csv','r');

%Cabecera del fichero.
cab=fgets(fid);
%Inicialización vectores para calcular medias y similares para utilizar en
%el calculo de la evaporación y precipitacion.
vectortemperatura=[];

```

```

vectorhumedad=[];
contadorlluvia=[]

diasllovidos=[];
diasllovidos=zeros(1,30);
%Bucle para leer la línea adecuada.
for x=1:handles.n
    linea=fgets(fid);
end

%Desglose de la información del fichero.
linea=fgets(fid);
[handles.dia,a,b,pos]=sscanf(linea,'%d',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.mes,a,b,pos]=sscanf(linea,'%d',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.ano,a,b,pos]=sscanf(linea,'%d',1);
linea=linea(pos+1:end);
[hora]=strread(linea,'%s','delimiter',';');
handles.hora=hora{1};
linea=linea(7:end);

[handles.temperatura,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.altura_nieve,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.humedad,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.precipitacion,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);

[handles.radiacion_solar_media,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.bateria,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.direccion,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.temp_maxima,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);

[handles.temp_minima,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.viento,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.racha_viento,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);

[handles.sensacion_termica,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);

```



```

[handles.radiacion_solar,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.alimentacion,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);
linea=linea(pos+1:end);
[handles.demandaelectrica,a,b,pos]=sscanf(linea,'%f',1);

%Vector viento.
handles.mediaviento=handles.viento;

%Vector temperatura.
vectortemperatura=[vectortemperatura handles.temperatura];
if length(vectortemperatura)<2880 %15min/prueba -> 1dia=96pruebas -> 30 dias=2880pruebas
    handles.mediatemperatura=mean(vectortemperatura);
else
    vectortemperatura=vectortemperatura(2:end);
    handles.mediatemperatura=mean(vectortemperatura);
end

%Vector humedad.
vectorhumedad=[vectorhumedad handles.humedad];
if length(vectorhumedad)<2880 %15min/prueba -> 1dia=96pruebas -> 30 dias=2880pruebas
    handles.mediahumedad=mean(vectorhumedad);
else
    vectorhumedad=vectorhumedad(2:end);
    handles.mediahumedad=mean(vectorhumedad);
end

% Vector lluvia.
if length(contadorlluvia)<96 %15min/prueba -> 1dia=96pruebas
    contadorlluvia=[contadorlluvia handles.precipitacion];
else
    diasllovidos=diasllovidos(2:end);
    lluviaacida=sum(contadorlluvia);
    if lluviaacida>=1
        diasllovidos=[diasllovidos 1];
        contadorlluvia=[];
    else
        diasllovidos=[diasllovidos 0];
        contadorlluvia=[];
    end
end
handles.numerodiasllovidos=sum(diasllovidos);
%Coeficiente mensual para calcular evaporación.
if handles.mes==1
    handles.cm=0.991;
    handles.insolacion=9.4/24;
elseif handles.mes==2
    handles.cm=1.035;
    handles.insolacion=10.5/24;

```

```

elseif handles.mes==3
    handles.cm=1.036;
    handles.insolacion=12/24;
elseif handles.mes==4
    handles.cm=1.065;
    handles.insolacion=13.5/24;
elseif handles.mes==5
    handles.cm=1.038;
    handles.insolacion=14.7/24;
elseif handles.mes==6
    handles.cm=1.045;
    handles.insolacion=15.4/24;
elseif handles.mes==7
    handles.cm=1.033;
    handles.insolacion=15/24;
elseif handles.mes==8
    handles.cm=0.997;
    handles.insolacion=13.9/24;
elseif handles.mes==9
    handles.cm=0.961;
    handles.insolacion=12.5/24;
elseif handles.mes==10
    handles.cm=0.947;
    handles.insolacion=11/24;
elseif handles.mes==11
    handles.cm=0.925;
    handles.insolacion=9.7/24;
elseif handles.mes==12
    handles.cm=0.968;
    handles.insolacion=9/24;
end
%Contador fichero de lectura.
handles.n=handles.n+1;

```

### 10.4.2 Panel estación meteorológica.

```

function [handles]=tiempomediajo(handles)

%TIEMPO:

%NUBLADO.
if handles.precipitacion==0 && handles.altura_nieve==0 && handles.temperatura<=15
    axes(handles.axes31);
    background=imread('nublado.jpg');
    imshow(background);
    axis off;

```

```

%SOLEADO.
elseif handles.precipitacion==0 && handles.altura_nieve==0 && handles.temperatura>15
    axes(handles.axes31);
    background=imread('sol.jpg');
    imshow(background);
    axis off;
%LLUVIA.
elseif (handles.precipitacion>0 && handles.altura_nieve==0)
    axes(handles.axes31);
    background=imread('lluvia.jpg');
    imshow(background);
    axis off;
%NIEVE.
elseif handles.altura_nieve>0
    axes(handles.axes31);
    background=imread('nieve.jpg');
    imshow(background);
    axis off;
end

%AVISOS:

% VIENTO.
if (handles.viento>=21 && handles.temperatura>0)
    axes(handles.axes32);
    axis off;
    set(handles.axes32,'visible','on');
    background=imread('viento.jpg');
    imshow(background);
%HIELO.
elseif handles.temperatura<=0
    axes(handles.axes32);
    axis off;
    set(handles.axes32,'visible','on');
    background=imread('hielo.jpg');
    imshow(background);
%LLUVIA. El aviso es 15litros/m2 a la hora -> >3.75l/m2 15min
elseif handles.precipitacion>=3.75
    axes(handles.axes32);
    axis off;
    set(handles.axes32,'visible','on');
    background=imread('aviso_lluvia.jpg');
    imshow(background);
%TEMPERATURA
elseif handles.temperatura>=34
    axes(handles.axes32);
    axis off;
    set(handles.axes32,'visible','on');
    background=imread('aviso_temperatura.jpg');

```

```
imshow(background);
%NO HAY AVISOS.
else
    axes(handles.axes32);
    axis off;
    set(handles.axes32,'visible','on');
    background=imread('ninguno.jpg');
    imshow(background);
end

%NOCHE.
if handles.radiacion_solar_medio<10
    axes(handles.axes33);
    axis off;
    background=imread('noche.jpg');
    imshow(background);

%DIA.
else
    axes(handles.axes33);
    axis off;
    background=imread('dia.jpg');
    imshow(background);

end

%TEXTOS FECHA.
set(handles.text349,'String',handles.hora);
set(handles.text350,'String',handles.dia);
set(handles.text352,'String',handles.ano);
if handles.mes==1
    set(handles.text351,'String','Enero');
elseif handles.mes==2
    set(handles.text351,'String','Febrero');
elseif handles.mes==3
    set(handles.text351,'String','Marzo');
elseif handles.mes==4
    set(handles.text351,'String','Abril');
elseif handles.mes==5
    set(handles.text351,'String','Mayo');
elseif handles.mes==6
    set(handles.text351,'String','Junio');
elseif handles.mes==7
    set(handles.text351,'String','Julio');
elseif handles.mes==8
    set(handles.text351,'String','Agosto');
elseif handles.mes==9
    set(handles.text351,'String','Septiembre');
elseif handles.mes==10
    set(handles.text351,'String','Octubre');
```

```

elseif handles.mes==11
    set(handles.text351,'String','Noviembre');
elseif handles.mes==12
    set(handles.text351,'String','Diciembre');
end

%TEXTOS TIEMPO.
set(handles.text362,'String',round(handles.sensacion_termica,2));
set(handles.text363,'String',round(handles.temperatura,2));
set(handles.text364,'String',round(handles.precipitacion,2));
set(handles.text365,'String',round(handles.viento,2));
set(handles.text366,'String',handles.direccion);
set(handles.text367,'String',round(handles.altura_nieve,2));
set(handles.text368,'String',round(handles.humedad,2));

```

### 10.4.3 Evaporación.

```

function [handles]=evaporacionguillen(handles)

%Constante.
k=2.957;
%Temperatura media mensual.
ct=-0.49+0.0621*handles.mediatemperatura;
%Humedad relativa promedio mensual.
ch=2.12-1.75*(handles.mediahumedad/100)^2;
%Velocidad del viento a 2 metros sobre la superficie del agua.
cw=0.728+0.0494*handles.viento;
%Insolación media mensual.
cs=0.53+0.784*handles.insolacion;
%Numero de dias de precipitacion mayores de 1mm durante el ultimo mes.
cdp=1.15-0.015*handles.numerodiasllovidos;
%Evaporación.
handles.Evaporacion=(k*ct*cw*cs*cdp*handles.cm)/96; %mm/15min.
%La evaporación no puede ser negativa.
if handles.Evaporacion<0
    handles.Evaporacion=0;
end

```

### 10.4.4 Precipitación.

```

function [handles]=programaprecipitacion(handles)

% 1mm = 1 litro/m2.

```

```
%superficie deposito superior = 44Ha = 440000m2
litrossup=440000*handles.precipitacion; %litros entran.
handles.precipitaciondepositosup=litrossup*1*10^-3; %m3

%superficie deposito inferior = 170Ha = 1700000m2
litrosinf=1700000*handles.precipitacion;
handles.precipitaciondepositoinf=litrosinf*1*10^-3; %m3
```

### 10.4.5 Límites depósitos.

```
function [handles]=limites_depositos(handles)

%LIMITES DEPÓSITO SUPERIOR.
if handles.depositosup<0
    handles.depositosup=0;
elseif handles.depositosup>100
    handles.depositosup=100;
end
handles.depositosuphm3=(handles.depositosup/100)*10+((handles.precipitaciondepositosup-
((handles.Evaporacion/1000)*440000))*1*10^-6); % hm3+(m3+m3)hm3;
if handles.depositosuphm3<0
    handles.depositosuphm3=0;
elseif handles.depositosuphm3>100
    handles.depositosuphm3=100;
end
handles.depositosup=(handles.depositosuphm3/10)*100;

% LIMITES DEPÓSITO INFERIOR.
if handles.depositoinf<0
    handles.depositoinf=0;
elseif handles.depositoinf>100
    handles.depositoinf=100;
end
handles.depositoinfhm3=(handles.depositoinf/100)*20.3+((handles.precipitaciondepositoinf-handles.Torina-
((handles.Evaporacion/1000)*1700000))*1*10^-6); % hm3+(m3+m3)hm3;
if handles.depositoinfhm3<0
    handles.depositoinfhm3=0;
elseif handles.depositoinfhm3>100
    handles.depositoinfhm3=100;
end
handles.depositoinf=(handles.depositoinfhm3/20.3)*100;
```

### 10.4.6 Límites caudales.

```
function [handles]=limite_caudal(handles)

%LÍMITES CAUDAL SUPERIOR.
if handles.aperturavalvulasup<35
    handles.aperturavalvulasup=0;
    handles.aperturavalvulasup1=0;
    handles.m3consumidos=0;
    handles.m3consumidos15min=0;
end

%LÍMITES CAUDAL INFERIOR.
if handles.aperturavalvulainf<35
    handles.aperturavalvulainf=0;
    handles.aperturavalvulainf1=0;
    handles.m3regenerados=0;
    handles.m3regenerados15min=0;
end
```

### 10.4.7 Panel apertura válvulas.

```
function [handles]=graficasvalvulas(handles)

%Dibujar apertura válvulas, carga y nivel depósitos.
if length(handles.vectoraperturaavalvulasup)<=25
    %Superior.
    handles.vectoraperturaavalvulasup=[handles.vectoraperturaavalvulasup handles.aperturaavalvulasup];
    handles.vaperturaavalvulasup1=[handles.vaperturaavalvulasup1 handles.aperturaavalvulasup1];
    handles.vdepositosup=[handles.vdepositosup handles.depositosup];
    %Inferior.
    handles.vectoraperturaavalvulainf=[handles.vectoraperturaavalvulainf handles.aperturaavalvulainf];
    handles.vaperturaavalvulainf1=[handles.vaperturaavalvulainf1 handles.aperturaavalvulainf1];
    handles.vdepositoinf=[handles.vdepositoinf handles.depositoinf];
else
    %Superior.
    handles.vectoraperturaavalvulasup=handles.vectoraperturaavalvulasup(25);
    handles.vaperturaavalvulasup1=handles.vaperturaavalvulasup1(25);
    handles.vdepositosup=handles.vdepositosup(25);
    %Inferior.
    handles.vectoraperturaavalvulainf=handles.vectoraperturaavalvulainf(25);
    handles.vaperturaavalvulainf1=handles.vaperturaavalvulainf1(25);
    handles.vdepositoinf=handles.vdepositoinf(25);
end

%PINTAR GRÁFICA SUPERIOR.
```

```

t=(0:length(handles.vectoraperturaavalvulasup)-1)*handles.Ts;
axes(handles.axes25);
plot(t,[handles.vectoraperturaavalvulasup', handles.vdepositosup', handles.vaperturaavalvulasup1]);
legend('Carga superior','Nivel depósito superior','Apertura válvula superior', 'Location','southoutside');
legend('boxoff');
axis([0 25 0 100]);
axis on

%PINTAR GRÁFICA INFERIOR.
t=(0:length(handles.vectoraperturaavalvulainf)-1)*handles.Ts;
axes(handles.axes26);
plot(t,[handles.vectoraperturaavalvulainf', handles.vdepositoinf', handles.vaperturaavalvulainf1]);
legend('Carga inferior','Nivel depósito inferior','Apertura válvula inferior', 'Location','southoutside');
legend('boxoff');
axis([0 25 0 100]);
axis on

```

### 10.4.8 Panel Caudales.

```

function [handles]=caudales(handles)

%CAUDALES.
if (handles.trasvase==1 && handles.aperturaavalvulainf>0 && handles.aperturaavalvulasup==0) || (handles.besaya==1 &&
handles.aperturaavalvulainf>0 && handles.aperturaavalvulasup==0)

    set(handles.text301,'String',round(handles.m3trasvase,3));
    set(handles.text307,'String',round(handles.m3trasvase15min,0));
    set(handles.text300,'String',round(handles.m3consumidos,3));
    set(handles.text306,'String',round(handles.m3consumidos15min,0));
else
    set(handles.text301,'String',round(handles.m3regenerados,3));
    set(handles.text307,'String',round(handles.m3regenerados15min,0));
    set(handles.text300,'String',round(handles.m3consumidos,3));
    set(handles.text306,'String',round(handles.m3consumidos15min,0));
end

%POTENCIA.
set(handles.text383,'String',handles.demandaelectrica);

```

### 10.4.9 Textos y gráficas del control automático.

```

function [handles]=textosygraficasautomatico(handles)

%-----

```



```

% Detección de apertura de las valvulas.
%-----

valsupabi='Válvula superior abierta';
valsupcer='Válvula superior cerrada';
valinfabi='Válvula inferior abierta';
valinfcer='Válvula inferior cerrada';

if (handles.aperturavalvulainf~=0 && handles.aperturavalvulasup==0)
    set(handles.text3,'String',valsupcer);
    set(handles.text3,'BackgroundColor','r');
    set(handles.text7,'String',valinfabi);
    set(handles.text7,'BackgroundColor','g');
    set(handles.text379,'String',handles.aperturavalvulainf1);
    set(handles.text376,'String',handles.aperturavalvulasup1);
elseif (handles.aperturavalvulasup~=0 && handles.aperturavalvulainf==0)
    set(handles.text3,'String',valsupabi);
    set(handles.text3,'BackgroundColor','g');
    set(handles.text7,'String',valinfcer);
    set(handles.text7,'BackgroundColor','r');
    set(handles.text376,'String',handles.aperturavalvulasup1);
    set(handles.text379,'String',handles.aperturavalvulainf1);
elseif (handles.aperturavalvulasup==0 && handles.aperturavalvulainf==0)
    set(handles.text3,'String',valsupcer);
    set(handles.text3,'BackgroundColor','r');
    set(handles.text7,'String',valinfcer);
    set(handles.text7,'BackgroundColor','r');
    set(handles.text376,'String',handles.aperturavalvulasup1);
    set(handles.text379,'String',handles.aperturavalvulainf1);
elseif (handles.aperturavalvulasup~=0 && handles.aperturavalvulainf~=0)
    set(handles.text3,'String',valsupabi);
    set(handles.text3,'BackgroundColor','g');
    set(handles.text7,'String',valinfabi);
    set(handles.text7,'BackgroundColor','g');
    set(handles.text376,'String',handles.aperturavalvulasup1);
    set(handles.text379,'String',handles.aperturavalvulainf1);
end

%-----
%Porcentaje de apertura de las valvulas.
%-----

%Redondeo a dos decimales de las valvulas.

handles.aperturavalvulasup=round(handles.aperturavalvulasup,2);
handles.aperturavalvulainf=round(handles.aperturavalvulainf,2);
set(handles.text2,'String',handles.aperturavalvulasup);
set(handles.text6,'String',handles.aperturavalvulainf);

```

```

%-----
%Pilotos de funcionamiento turbina.
%-----

siexcedentes='Hay Excendentes eléctricos';
noexcedentes='No hay excendentes eléctricos';

if handles.demandaelectrica<0
    set(handles.text16,'String',siexcedentes);
    set(handles.text16,'BackgroundColor','g');
    set(handles.text17,'String','Consumo de potencia: ');
    if (handles.aperturavalvulainf>0 | handles.aperturavalvulasup>0)
        set(handles.text21,'String','Turbina encendida');
        set(handles.text21,'BackgroundColor','g');
    end
elseif handles.demandaelectrica>0
    set(handles.text16,'String',noexcedentes);
    set(handles.text16,'BackgroundColor','r');
    set(handles.text17,'String','Generación de potencia: ');
    if (handles.aperturavalvulainf>0 | handles.aperturavalvulasup>0)
        set(handles.text21,'String','Turbina encendida');
        set(handles.text21,'BackgroundColor','g');
    end
end
end
if (handles.aperturavalvulasup==0 && handles.aperturavalvulainf==0)
    set(handles.text21,'String','Turbina parada');
    set(handles.text21,'BackgroundColor','r');
end

%Potencia generada.
set(handles.text26,'String',round(handles.mvativos,3));

%-----
%Gráficos de nivel depositos.
%-----

axes(handles.axes2);
y=[0 handles.depositoinfhm3 handles.depositoinfhm3 0];
fill(handles.x,y,'b');
set(gca,'FontSize',12,'XTick',[]);
axis([0 1 0 20.3]) ;
axes(handles.axes1);
y=[0 handles.depositosuphm3 handles.depositosuphm3 0];
fill(handles.x,y,'b');
set(gca,'FontSize',12,'XTick',[]);
axis([0 1 0 10]);

handles.depositosup=round(handles.depositosup,3);
handles.depositoinf=round(handles.depositoinf,3);

```

```
set(handles.text22,'String',handles.depositosup);
set(handles.text23,'String',handles.depositoinf);
```

### 10.4.10 Gráficas demanda eléctrica.

```
function [handles]=graficasdemanda(handles)

%Dibujar megavatios.
if length(handles.vdemandaelectrica)<=96
    handles.vdemandaelectrica=[handles.vdemandaelectrica handles.demandaelectrica];
    handles.vlinea=[handles.vlinea 0];
else
    handles.vdemandaelectrica=handles.vdemandaelectrica(96);
    handles.vlinea=handles.vlinea(96);
end

%PINTAR GRÁFICA.
t=(0:length(handles.vdemandaelectrica)-1)*handles.Ts;
axes(handles.axes34);
plot(t,[handles.vdemandaelectrica',handles.vlinea']);
legend('Potencia de la red','Location','southoutside');
legend('boxoff');
axis([0 96 -339.2 339.2]);
axis on
```

### 10.4.11 Fichero de escritura de datos.

```
function [handles]=exportarfichero(handles)

%Abrir fichero de escritura.
fid2=fopen('Apertura_valvulas.txt','a');
%Cabecera.
if handles.n==2
    fprintf(fid2,'Fecha;Hora;Nivel deposito superior (hm3);Nivel deposito inferior (hm3);Nivel deposito superior (Porcentaje);Nivel
    deposito superior (Porcentaje);Carga superior (Porcentaje);Carga inferior (Porcentaje); Caudal valvula inferior
    (m3/15min);Caudal valvula superior (m3/15min); Caudal valvula inferior (m3/s);Caudal valvula superior (m3/s)\n');
else
    %Pintar datos.
    fprintf(fid2,'%d/',handles.dia);
    fprintf(fid2,'%d/',handles.mes);
    fprintf(fid2,'%d',handles.ano);
    fprintf(fid2,'%s',handles.hora);
    fprintf(fid2,'%f',round(handles.depositosuphm3,3));
    fprintf(fid2,'%f',round(handles.depositoinfhm3,3));
```

```

fprintf(fid2,'%f',round(handles.depositosup,3));
fprintf(fid2,'%f',round(handles.depositoinf,3));
fprintf(fid2,'%f',round(handles.aperturavalvulasup,2));
fprintf(fid2,'%f',round(handles.aperturavalvulainf,2));
fprintf(fid2,'%f',round(handles.m3regenerados15min,0));
fprintf(fid2,'%f',round(handles.m3consumidos15min,0));
fprintf(fid2,'%f',round(handles.m3regenerados,3));
fprintf(fid2,'%f \n',round(handles.m3consumidos,3));
end
%Cerrar fichero.
fclose(fid2);

```

### 10.4.12 Interacción con el usuario.

```

function [handles]=informacionusuario_manual(handles)

%SLIDER.
handles.aperturavalvulasup=get(handles.slider10,'Value');
if (handles.aperturavalvulasup>0 && handles.aperturavalvulainf==0)
    handles.aperturavalvulainf=0;
else
    handles.aperturavalvulainf=get(handles.slider11,'Value');
    handles.aperturavalvulasup=0;
end

%EDIT.
handles.aperturavalvulasup=str2double(get(handles.edit2,'String'));
if (handles.aperturavalvulasup>0 && handles.aperturavalvulainf==0)
    handles.aperturavalvulainf=0;
else
    handles.aperturavalvulainf=str2double(get(handles.edit3,'String'));
    handles.aperturavalvulasup=0;
end

%TRASVASES.
handles.trasvase=get(handles.checkbox2,'Value');
handles.besaya=get(handles.checkbox3,'Value');

%LÍMITES APERTURA VÁLVULAS.
if handles.aperturavalvulasup>100
    handles.aperturavalvulasup=100;
elseif handles.aperturavalvulainf>100
    handles.aperturavalvulainf=100;
end

if handles.aperturavalvulasup<0

```

```

handles.aperturavalvulasup=0;
elseif handles.aperturavalvulainf<0
    handles.aperturavalvulainf=0;
end

```

### 10.4.13 Textos y gráficas del control manual.

```

function [handles]=textosygraficasmanual(handles)

%-----
% Detección de apertura de las valvulas.
%-----

valsupabi='Válvula superior abierta';
valsupcer='Válvula superior cerrada';
valinfabi='Válvula inferior abierta';
valinfcer='Válvula inferior cerrada';

if (handles.aperturavalvulainf~=0 && handles.aperturavalvulasup==0)
    set(handles.text3,'String',valsupcer);
    set(handles.text3,'BackgroundColor','r');
    set(handles.text7,'String',valinfabi);
    set(handles.text7,'BackgroundColor','g');
    set(handles.text379,'String',handles.aperturavalvulainf1);
    set(handles.text376,'String',handles.aperturavalvulasup1);
elseif (handles.aperturavalvulasup~=0 && handles.aperturavalvulainf==0)
    set(handles.text3,'String',valsupabi);
    set(handles.text3,'BackgroundColor','g');
    set(handles.text7,'String',valinfcer);
    set(handles.text7,'BackgroundColor','r');
    set(handles.text376,'String',handles.aperturavalvulasup1);
    set(handles.text379,'String',handles.aperturavalvulainf1);
elseif (handles.aperturavalvulasup==0 && handles.aperturavalvulainf==0)
    set(handles.text3,'String',valsupcer);
    set(handles.text3,'BackgroundColor','r');
    set(handles.text7,'String',valinfcer);
    set(handles.text7,'BackgroundColor','r');
    set(handles.text376,'String',handles.aperturavalvulasup1);
    set(handles.text379,'String',handles.aperturavalvulainf1);
elseif (handles.aperturavalvulasup~=0 && handles.aperturavalvulainf~=0)
    set(handles.text3,'String',valsupabi);
    set(handles.text3,'BackgroundColor','g');
    set(handles.text7,'String',valinfabi);
    set(handles.text7,'BackgroundColor','g');
    set(handles.text376,'String',handles.aperturavalvulasup1);
    set(handles.text379,'String',handles.aperturavalvulainf1);

```

```

end

%-----
%Porcentaje de apertura de las valvulas.
%-----

handles.aperturavalvulasup=round(handles.aperturavalvulasup,2);
handles.aperturavalvulainf=round(handles.aperturavalvulainf,2);
set(handles.text2,'String',handles.aperturavalvulasup);
set(handles.text6,'String',handles.aperturavalvulainf);

%-----
%Pilotos tipo de funcionamiento turbina.
%-----

siexcedentes='Hay Excedentes eléctricos';
noexcedentes='No hay excedentes eléctricos';

if handles.demandaelectrica<0
    set(handles.text16,'String',siexcedentes);
    set(handles.text16,'BackgroundColor','g');
    if (handles.aperturavalvulasup>0 || handles.aperturavalvulainf>0)
        set(handles.text21,'String','Turbina encendida');
        set(handles.text21,'BackgroundColor','g');
    end
elseif handles.demandaelectrica>0
    set(handles.text16,'String',noexcedentes);
    set(handles.text16,'BackgroundColor','r');
    if (handles.aperturavalvulasup>0 || handles.aperturavalvulainf>0)
        set(handles.text21,'String','Turbina encendida');
        set(handles.text21,'BackgroundColor','g');
    end
end
end
if (handles.aperturavalvulasup==0 && handles.aperturavalvulainf==0)
    set(handles.text21,'String','Turbina parada');
    set(handles.text21,'BackgroundColor','r');
end

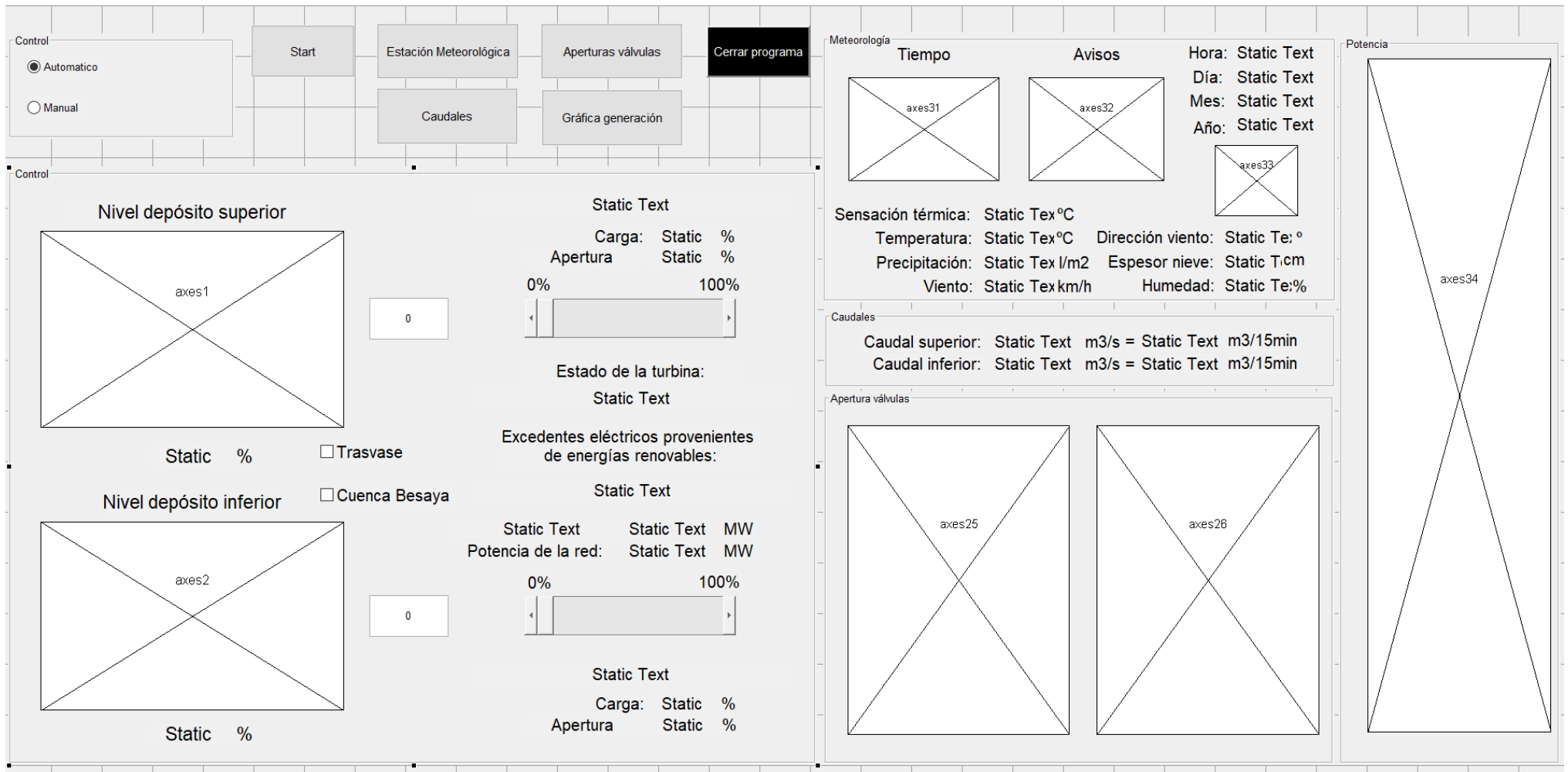
%TRASVASE.
if (handles.aperturavalvulainf==0) || (handles.aperturavalvulainf>0 && handles.besaya==1) || (handles.aperturavalvulainf>0 &&
handles.trasvase==1)
    set(handles.text17,'String','Generación de potencia: ');
%BOMBEO.
elseif (handles.aperturavalvulainf>0 && handles.trasvase==0 && handles.besaya==0)
    set(handles.text17,'String','Consumo de potencia: ');
end

%Potencia generada.
set(handles.text26,'String',round(handles.mvatos,3));

```

```
%-----  
%Gráficos de nivel depositos.  
%-----  
axes(handles.axes2);  
y=[0 handles.depositoinfhm3 handles.depositoinfhm3 0];  
fill(handles.x,y,'b');  
set(gca,'FontSize',12,'XTick',[]);  
axis([0 1 0 20.3]);  
axes(handles.axes1);  
  
y=[0 handles.depositosuphm3 handles.depositosuphm3 0];  
fill(handles.x,y,'b');  
set(gca,'FontSize',12,'XTick',[]);  
axis([0 1 0 10]);  
  
handles.depositosup=round(handles.depositosup,3);  
handles.depositoinf=round(handles.depositoinf,3);  
set(handles.text22,'String',handles.depositosup);  
set(handles.text23,'String',handles.depositoinf);
```

## 10.5 Interfaz Matlab GUIDE.





## 10.6 Generador de la demanda eléctrica.

```

%Fichero de lectura.
fid=fopen('alsanatural1.csv','r');
%Fichero de escritura.
fid1=fopen('demandaelectrica1.txt','w');
%Cabecera.
cab=fgets(fid);
demanda=zeros(1,43773); %43773
%Primer valor de la demanda.
demanda(1)=40;
%Detector día de la semana.
diamio=1;
%Detector de la hora.
horamio=0;
fprintf(fid1,'%f \n',demanda(1));
for i=2:43773
    horapunta=0;
    horavalle=0;
    horamedia=0;
    linea=fgets(fid);
    [dia,a,b,pos]=sscanf(linea,'%d',1);
    linea=linea(pos+1:end);
    [mes,a,b,pos]=sscanf(linea,'%d',1);
    linea=linea(pos+1:end);
    [ano,a,b,pos]=sscanf(linea,'%d',1);
    linea=linea(pos+1:end);
    [hora]=strread(linea,'%s','delimiter',';');
    hora=hora{1};
    horamio=horamio+1;
    %Para saber si es fin de semana.
    if horamio>96
        horamio=0;
        %Empezamos en Martes.
        diamio=diamio+1;
    end

    if (diamio==6 | diamio==7)
        %FIN DE SEMANA.
        %Horas valle.
        if (hora=='02:00' | hora=='02:15' | hora=='02:30' | hora=='02:45' | hora=='03:00' | hora=='03:15' | hora=='03:30' |
hora=='03:45' | hora=='04:00' | hora=='04:15' | hora=='04:30' | hora=='04:45' | hora=='05:00' | hora=='05:15' | hora=='05:30' |
hora=='05:45' | hora=='06:00')
            horavalle=1;
            horapunta=0;
            horamedianegativa=0;
            horamediapositiva=0;
            %Horas punta.
            elseif (hora=='10:00' | hora=='10:15' | hora=='10:30' | hora=='10:45' | hora=='11:00' | hora=='11:15' | hora=='11:30' |

```

```

hora=='11:45' | hora=='12:00' | hora=='12:15' | hora=='12:30' | hora=='12:45' | hora=='13:00' | hora=='13:15' | hora=='13:30' |
hora=='13:45' | hora=='13:00' | hora=='18:00' | hora=='18:15' | hora=='18:30' | hora=='18:45' | hora=='19:00' | hora=='19:15' |
hora=='19:30' | hora=='19:45' | hora=='20:00' | hora=='20:15' | hora=='20:30' | hora=='20:45' | hora=='20:00' | hora=='21:15' |
hora=='21:30' | hora=='21:45' | hora=='22:00')
    horapunta=1;
    horavalle=0;
    horamedianegativa=0;
    horamediapositiva=0;
    % Hora normal disminuyendo.
    elseif (hora=='22:15' | hora=='22:30' | hora=='22:45' | hora=='23:00' | hora=='23:15' | hora=='23:30' | hora=='23:45' |
hora=='00:00' | hora=='00:15' | hora=='00:30' | hora=='00:45' | hora=='01:00' | hora=='01:15' | hora=='01:30' | hora=='01:45')
        horamedianegativa=1;
        horavalle=0;
        horapunta=0;
        horamediapositiva=0;
        % Hora normal aumentando
        elseif (hora=='06:15' | hora=='06:30' | hora=='06:45' | hora=='07:00' | hora=='07:15' | hora=='07:30' | hora=='07:45' |
hora=='08:00' | hora=='08:15' | hora=='08:30' | hora=='08:45' | hora=='09:00' | hora=='09:15' | hora=='09:30' | hora=='09:45')
            horamediapositiva=1;
            horavalle=0;
            horapunta=0;
            horamedianegativa=0;
        %Hora mantenida.
        else
            horamedia=1;
        end

    if horapunta==1
        demanda(i)=demanda(i-1)+5*rand(1);
        % Si se supera la potencia umbral.
        if demanda(i)>100
            demanda(i)=100;
        end

    elseif horavalle==1
        demanda(i)=demanda(i-1)-20*rand(1);
        %Potencias límite.
        if demanda(i)<-339.2
            demanda(i)=-339.2;
        end
        if demanda(i)>339.2
            demanda(i)=339.2;
        end

    elseif horamedianegativa==1
        demanda(i)=demanda(i-1)-20*rand(1);
        % Si se supera la potencia umbral.
        if demanda(i)<-339.2
            demanda(i)=-339.2;

```

```

elseif demanda(i)>50
    demanda(i)=50;
end

elseif horamediapositiva==1
    demanda(i)=demanda(i-1)+10*rand(1);
    % Si se supera la potencia umbral.
    if demanda(i)>20
        demanda(i)=20;
    elseif demanda(i)<-250
        demanda(i)=-250;
    end
    %Horas normales.
else
    demanda(i)=demanda(i-1)-12*randn(1);
    %Potencias límite.
    if demanda(i)<-339.2
        demanda(i)=-339.2;
    end
end
end

else
    %ENTRE SEMANA.
    %Horas valle.
    if (hora=='02:00' | hora=='02:15' | hora=='02:30' | hora=='02:45' | hora=='03:00' | hora=='03:15' | hora=='03:30' |
    hora=='03:45' | hora=='04:00' | hora=='04:15' | hora=='04:30' | hora=='04:45' | hora=='05:00' | hora=='05:15' | hora=='05:30' |
    hora=='05:45' | hora=='06:00')
        horavalle=1;
        horapunta=0;
        horamedianegativa=0;
        horamediapositiva=0;
    %Horas punta.
    elseif (hora=='10:00' | hora=='10:15' | hora=='10:30' | hora=='10:45' | hora=='11:00' | hora=='11:15' | hora=='11:30' |
    hora=='11:45' | hora=='12:00' | hora=='12:15' | hora=='12:30' | hora=='12:45' | hora=='13:00' | hora=='13:15' | hora=='13:30' |
    hora=='13:45' | hora=='13:00' | hora=='18:00' | hora=='18:15' | hora=='18:30' | hora=='18:45' | hora=='19:00' | hora=='19:15' |
    hora=='19:30' | hora=='19:45' | hora=='20:00' | hora=='20:15' | hora=='20:30' | hora=='20:45' | hora=='20:00' | hora=='21:15' |
    hora=='21:30' | hora=='21:45' | hora=='22:00')
        horapunta=1;
        horavalle=0;
        horamedianegativa=0;
        horamediapositiva=0;
    % Hora normal disminuyendo.
    elseif (hora=='22:15' | hora=='22:30' | hora=='22:45' | hora=='23:00' | hora=='23:15' | hora=='23:30' | hora=='23:45' |
    hora=='00:00' | hora=='00:15' | hora=='00:30' | hora=='00:45' | hora=='01:00' | hora=='01:15' | hora=='01:30' | hora=='01:45')
        horamedianegativa=1;
        horavalle=0;
        horapunta=0;
        horamediapositiva=0;
    % Hora normal aumentando
    elseif (hora=='06:15' | hora=='06:30' | hora=='06:45' | hora=='07:00' | hora=='07:15' | hora=='07:30' | hora=='07:45' |

```

```

hora=='08:00' | hora=='08:15' | hora=='08:30' | hora=='08:45' | hora=='09:00' | hora=='09:15' | hora=='09:30' | hora=='09:45')
    horamediapositiva=1;
    horavalle=0;
    horapunta=0;
    horamedianegativa=0;
    %Hora mantenida.
else
    horamedia=1;
end

if horapunta==1
    demanda(i)=demanda(i-1)+8*rand(1);
    % Si se supera la potencia maxima o umbral.
    if demanda(i)>339.2
        demanda(i)=339.2;
    elseif demanda(i)<80
        demanda(i)=80;
    end

elseif horavalle==1
    demanda(i)=demanda(i-1)-15*rand(1);
    % Si se supera la potencia maxima o umbral.
    if demanda(i)<-339.2
        demanda(i)=-339.2;
    end
    if demanda(i)>-40
        demanda(i)=-40;
    end

elseif horamedianegativa==1
    demanda(i)=demanda(i-1)-28*rand(1);
    % Si se supera la potencia maxima o umbral.
    if demanda(i)<-339.2
        demanda(i)=-339.2;
    elseif demanda(i)>150
        demanda(i)=150;
    end

elseif horamediapositiva==1
    demanda(i)=demanda(i-1)+18*rand(1);
    % Si se supera la potencia maxima o umbral.
    if demanda(i)>339.2
        demanda(i)=339.2;
    end
    if demanda(i)<-50
        demanda(i)=-50;
    end

    %Horas normales.
else
    sensor=randn(1);

```

```
if sensor<0
    demanda(i)=demanda(i-1)-5*randn(1);
else
    demanda(i)=demanda(i-1)+5*randn(1);
end
%Potencias límite.
if demanda(i)>339.2
    demanda(i)=339.2;
elseif demanda(i)<-339.2
    demanda(i)=-339.2;
end
end
end
%Nueva semana.
if diamio==7
    diamio=0;
end
demanda(i)=round(demanda(i),5,'significant');
fprintf(fid1,'%f \n',demanda(i));
end
```